



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 논문

계측자료를 이용한 배수재 적용 지반의
침하량 예측기법의 개발

A Development of Settlement Estimation Method on the
Drain-Improved Soft Ground using Field Measurement Data



지도교수 김 태 형

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

강 성 현

본 논문을 강성현의 공학박사 학위논문으로 인준함.

위원장 김 찬 기 (인)

위 원 서 영 교 (인)

위 원 이 중 우 (인)

위 원 경 갑 수 (인)

위 원 김 태 형 (인)

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Abstract	xi

제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 동향	3
1.3 연구 목적	5
1.4 연구 내용	6

제 2 장 기존의 연구

2.1 침하예측기법	8
2.1.1 Hyperbolic법	8
2.1.2 Hoshino법	9
2.1.3 \sqrt{S} 법	11
2.1.4 $\log S$ 법	12
2.1.5 Asaoka법	13
2.1.6 Monden법	15
2.1.7 비선형회귀법	16
2.2 압밀도 산정	19
2.2.1 Barron의 제안식	19
2.2.2 Hansbo의 제안식	20
2.2.3 Yoshikuni의 제안식	20

2.2.4 Onoue의 제안식	21
2.2.5 점증재하를 고려한 압밀도 및 침하시간 계산	21

제 3 장 연구대상 현장

3.1 화전지구	24
3.1.1 지형, 지질 및 지반정수	24
3.1.2 구역 및 지반 개량 현황	27
3.1.3 계측기 설치 및 계측 현황	29
3.2 미음지구	31
3.2.1 지형, 지질 및 지반정수	31
3.2.2 구역 및 지반 개량 현황	34
3.2.3 계측기 설치 및 계측 현황	36

제 4 장 새로운 침하 예측기법

4.1 Kang's법	38
4.2 2 nd -Hyperbolic법	41
4.3 1-D Theory Simulation법	42
4.4 Kang's법을 이용한 단계성토별 시간-침하량 예측법	45
4.5 요약	51

제 5 장 침하량 예측기법 분석 및 검증

5.1 1차원압밀이론 침하량을 이용한 예측	53
5.1.1 침하량 산정 조건	53
5.1.2 예측기법에 의한 최종침하량 산정 결과 및 분석	64
5.2 수평배수이론 침하량을 이용한 예측	70
5.2.1 침하량 산정 조건	70
5.2.2 예측기법에 의한 최종침하량 산정 결과 및 분석	71

5.3 유한요소 해석 침하량을 이용한 예측	77
5.3.1 침하량 산정 조건	77
5.3.2 예측기법에 의한 최종침하량 산정 결과 및 분석	80
5.4 요약	87
 제 6 장 현장계측에 의한 침하량 예측 분석	
6.1 화전지구	89
6.1.1 최종침하량 산정 결과 및 분석	89
6.1.2 Kang's법을 이용한 단계성토별 시간-침하량	99
6.2 미음지구	105
6.2.1 최종침하량 산정 결과 및 분석	105
6.2.2 Kang's법을 이용한 단계성토별 시간-침하량	112
6.3 성토 단계별 시간-침하량 곡선의 변화	115
6.4 요약	118
 제 7 장 결론	120
 참고문헌	123
 부록	129

List of Tables

Table 3.1 Soil parameters(Hwajeon site)	26
Table 3.2 Fill and rock parameters(Hwajeon site)	26
Table 3.3 Characteristics of the prefabricated drain boards used in Hwajeon site	27
Table 3.4 Ground improvement depth for each zone(Hwajeon site)	27
Table 3.5 Status of the adopted monitoring system(Hwajeon site) ...	29
Table 3.6 Soil parameters(Meeum site)	33
Table 3.7 Design values for each zone(Meeum site)	33
Table 3.8 Unit weight of fill material(Meeum site)	33
Table 3.9 Description of the divided zones	34
Table 3.10 Status of the adopted monitoring system(Meeum site) ..	36
Table 4.1 Comparison of $T_v - \bar{U}$ in Terzaghi and Sivaram and Swamee theories	44
Table 4.2 Example of soil parameters determined by using field and laboratory tests	47
Table 4.3 In-situ vertical effective stress	47
Table 4.4 Parameters of horizontal drainage theory(Hansbo, 1981) ...	48
Table 4.5 Soil Parameter for Kang's method	49
Table 4.6 Time - settlement curve by Kang's method	50
Table 5.1 Values used for construction of the time - settlement curve by Terzaghi's theory	53
Table 5.2 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method using the settlement curve estimated by Terzaghi's theory	54
Table 5.3 Values of C_1 and C_2 according to variation of the settlement layer(H)	58

Table 5.4 Values of C_1 and C_2 according to variation of the initial void ratio(e_0)	58
Table 5.5 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the depth of settlement layer(H) using the settlement curve estimated by Terzaghi's theory	60
Table 5.6 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the initial void ratio(e_0) using the settlement curve estimated by Terzaghi's theory	61
Table 5.7 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve estimated by Terzaghi's theory	66
Table 5.8 Values used for construction of the time - settlement curve proposed by the horizontal drainage theory	70
Table 5.9 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory	73
Table 5.10 Values used for construction of the time - settlement curve proposed by the finite element method	77
Table 5.11 Composition of analysis program	79
Table 5.12 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the finite element method	82
Table 6.1 Comparison of the final settlements predicted by each method(Hwajeon site)	92
Table 6.2 Comparison of the final settlements predicted by each method(Meeum site)	107

List of Figures

Fig. 1.1 Flowchart of study process	7
Fig. 2.1 Time - settlement curve	10
Fig. 2.2 Hyperbolic method: $(t - t_i)$ vs. $(t - t_i)/(S_t - S_i)$	10
Fig. 2.3 Hoshino method: $(t - t_i)$ vs. $(t - t_i)/(S_t - S_i)^2$	10
Fig. 2.4 \sqrt{S} method: $(t - t_i)$ vs. $(t - t_i)/\sqrt{(S_t - S_i)}$	11
Fig. 2.5 $\text{Log } S$ method: $(t - t_i)$ vs. $(t - t_i)/\text{Log}(S_t - S_i)$	12
Fig. 2.6 Asaoka's method	14
Fig. 2.7 Application of Asaoka's method	15
Fig. 2.8 Monden method: t vs. $\log(1 - U)$	16
Fig. 2.9 Modification technique of time - settlement curve for gradual increase load	23
Fig. 3.1 Location of Hwajeon site	25
Fig. 3.2 Soil layer distribution of Hwajeon site	25
Fig. 3.3 Status of soft ground improvement(Hwajeon site)	28
Fig. 3.4 Data monitored settlement plate(Hwajeon site)	30
Fig. 3.5 Location of Meeum site	32
Fig. 3.6 Soil layer distribution of Meeum site	32
Fig. 3.7 Status of soft ground improvement(Meeum site)	35
Fig. 3.8 Data monitored settlement plate(Meeum site)	37
Fig. 4.1 Flowchart for Kang's method	46
Fig. 4.2 Verification for settlement analysis according to staged filling between Kang's method and Kconsol program	50
Fig. 5.1 Time - settlement curve proposed by Terzaghi's theory)	54
Fig. 5.2 Results of the final settlement by 1-D Theory Simulation method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	55

Fig. 5.3 Results of analysis predicted by three methods of 1-D Theory Simulation method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	57
Fig. 5.4 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the depth of settlement layer(H) using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory ...	62
Fig. 5.5 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the initial void ratio(e_0) using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory ...	63
Fig. 5.6 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	67
Fig. 5.7 Comparison of the final settlements between Hoshino method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	68
Fig. 5.8 Comparison of the final settlements between Kang's method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	68
Fig. 5.9 Comparison of the final settlements between 2 nd -Hyperbolic method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	69
Fig. 5.10 Comparison of the final settlements between 1-D Theory Simulation method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	69
Fig. 5.11 Time - settlement curve proposed by the horizontal drainage theory ·	71
Fig. 5.12 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory	74

Fig. 5.13	Comparison of the final settlements between Kang's method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory	75
Fig. 5.14	Comparison of the final settlements between 2 nd -Hyperbolic method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory	75
Fig. 5.15	Comparison of the final settlements between 1-D Theory Simulation method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory	76
Fig. 5.16	Time - settlement curve proposed by the finite element method ..	78
Fig. 5.17	A example of deformed mesh and contour after analysis ...	79
Fig. 5.18	A example of calculated time - settlement curve after analysis	80
Fig. 5.19	Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the finite element method	83
Fig. 5.20	Comparison of the final settlements between Hoshino method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method	84
Fig. 5.21	Comparison of the final settlements between Kang's method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method	84
Fig. 5.22	Comparison of the final settlements between 2 nd -Hyperbolic method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method	85
Fig. 5.23	Comparison of the final settlements between 1-D Theory Simulation method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method	85

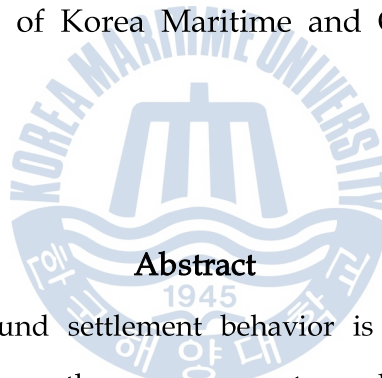
Fig. 5.24 Comparison of the final settlements between Hyperbolic method, Hoshino method and 2 nd -Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method	86
Fig. 6.1 Comparison of the final settlements predicted by each method(Hwajeon site)	95
Fig. 6.2 Comparison of settlements between prediction/mean settlement and analysis methods(Hwajeon site)	95
Fig. 6.3 Comparison of the settlements between prediction/Hyperbolic settlement and analysis methods(Hwajeon site)	96
Fig. 6.4 Comparison of the settlements between Kang's/Hyperbolic settlement and analysis methods(Hwajeon site)	96
Fig. 6.5 Comparison of the settlements between 2 nd -Hyperbolic/Hyperbolic settlement and analysis methods(Hwajeon site)	97
Fig. 6.6 Comparison of the settlements between 1-D Theory Simulation /Hyperbolic settlement and analysis methods(Hwajeon site)	97
Fig. 6.7 Results of RMSE analysis(Hwajeon site)	98
Fig. 6.8 Settlement correlation between Hyperbolic and Kang's methods (Hwajeon site)	98
Fig. 6.9 Time - settlement curve predicted by Kang's method(P-1 zone)	101
Fig. 6.10 Time - settlement curve predicted by Kang's method(P-3 zone)	102
Fig. 6.11 Time - settlement curve predicted by Kang's method(P-4 zone) ..	102
Fig. 6.12 Time - settlement curve predicted by Kang's method(SP-1 zone)	103
Fig. 6.13 Time - settlement curve predicted by Kang's method(P-57 zone)	103
Fig. 6.14 Time - settlement curve predicted by Kang's method(P-60 zone)	104
Fig. 6.15 Comparison of the final settlements predicted by each method(Meeum site)	108
Fig. 6.16 Comparison of settlements between prediction/mean settlement and analysis methods(Meeum site)	108

Fig. 6.17 Comparison of the settlements between prediction/ Hyperbolic settlement and analysis methods(Meeum site)	109
Fig. 6.18 Comparison of the settlements between Kang's/ Hyperbolic settlement and analysis methods(Meeum site)	109
Fig. 6.19 Comparison of the settlements between 2 nd -Hyperbolic/ Hyperbolic settlement and analysis methods(Meeum site)	110
Fig. 6.20 Comparison of the settlements between 1-D Theory Simulation /Hyperbolic settlement and analysis methods(Meeum site)	110
Fig. 6.21 Results of RMSE analysis(Meeum site)	111
Fig. 6.22 Settlement correlation between Hyperbolic and Kang's methods(Meeum site)	111
Fig. 6.23 Time - settlement curve predicted by Kang's method(S-0 zone)	113
Fig. 6.24 Time - settlement curve predicted by Kang's method(S-131 zone)	113
Fig. 6.25 Time - settlement curve predicted by Kang's method(S-65 zone) ..	114
Fig. 6.26 Time - settlement curve predicted by Kang's method(S-124 zone)	114
Fig. 6.27 Time - settlement curve predicted by Kang's method according to staged filling(P-4 zone)	116
Fig. 6.28 Time - settlement curve predicted by Kang's method according to staged filling(P-19 zone)	117

A Development of Settlement Estimation Method on the Drain-Improved Soft Ground using Field Measurement Data

Kang, Seong-Hyeon

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

In the field, the ground settlement behavior is monitored through the instrumentation. Based on the measurement results, future settlement is predicted and evaluated. Soft soil improvement using both preloading and vertical drain is generally adopted with a staged filling at the construction site. To determine an optimal filling height and filling loading period the settlement should be predicted. Therefore, Hyperbolic method, Asaoka method, and other methods are being used in the field for this purpose. However, these methods are only able to predict settlement after a certain filling stage (usually the final filling stage). In addition, the reliability of these methods are significantly varied depending on the geologic profile, instrument condition, and etc in the

field. Therefore the engineers should be very cautious and have a correct judgement when using these methods for the prediction of settlement.

This study suggests new three methods which are improved the weak points of the existed methods. The suggested methods are Kang's method, 2nd-Hyperbolic method, and 1-D Theory Simulation method, respectively. The Kang's method, the 2nd-Hyperbolic method, and the 1-D Theory Simulation method are based on the horizontal drainage theory, the existed Hyperbolic method, and Terzaghi's theory, respectively. Especially, the Kang's method can be able to incorporate the field's soil properties. The Kang's method can indirectly predict soil parameters and verify the ground characteristics through the back analysis of the predicted settlement. Also, this method can be used for estimation of drain's characteristics related to the consolidation effect.

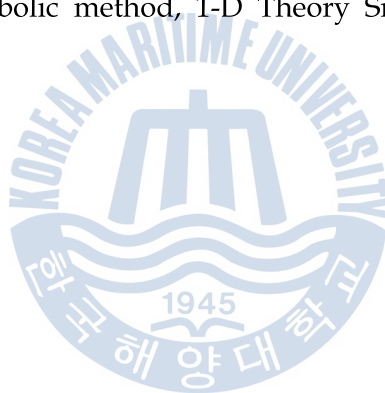
To verify the applicability of the Kang's method, the 2nd-Hyperbolic method, and the 1-D Theory Simulation method, two sites near the Nackdong-river are selected. The ground of these sites were improved by a vertical drain. The settlements are predicted by both the existed and the new methods and then are compared to the measured data.

The settlement predicted by the Kang's method shows little compared to those of the other methods. However, the comparison results indicate the Kang's method has enough reliability to use for the settlement prediction. The 2nd-Hyperbolic method predicts little higher settlement compared to that of the Hyperbolic method, but it shows much better reliability compared to the Hoshino method. It also shows that the 1D-Theory Simulation method overestimates settlement with very irregular trend on the vertical drain improved ground.

Using the Kang's method, the settlement data measured during the

initial filling are analyzed to obtain the soil parameters which need to predict the settlement curve. Then using the obtained soil parameters the time - settlement curve is predicted for the next filling stage and compared to the measured one. The predicted settlement is well matched with the measured one. Based on the study results, the Kang's method is able to predict settlement during the staged filling with only the initial settlement data and might be used usefully for construction management of the staged filling project.

KEY WORDS: Settlement, Vertical drain, Staged filling, Kang's method, 2nd-Hyperbolic method, 1-D Theory Simulation method,



제 1 장 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

연약지반으로 주로 구성되어 있는 한반도의 서·남해안 지역과 내륙의 저습지를 활용하기 위한 대규모 매립 공사가 시도됨에 따라 연약지반에 대한 많은 문제점들이 심각하게 대두되고 있다(김영남 & 이강일, 1996; 김운태, 1997, 김형주 & 원명수, 1997). 일반적으로 연약지반상에 택지, 도로 및 구조물을 설치하는 경우에는 과도한 침하 및 지지력 부족에 의한 문제가 발생할 수 있으며, 특히 연약지반은 침하량이 상당히 크고 또한 장기간에 걸쳐 침하가 발생하므로 구조물의 안정 및 사용성에 큰 영향을 미친다(Choa, 1995; Balasubramaniam et al., 1989; Stark et al., 1999; Mesri and Choi, 1985; Mesri and Lo, 1991; Li and Rowe, 2001; Lerouil et al., 1990).

건설 및 유지관리 관점에서 흙의 침하는 더욱 중요한 문제로 대두되는데 어느 정도 압밀침하가 발생하는가와 압밀침하가 종료되는데 소요되는 시간 그리고 시공이전 설계 단계에서 장래침하량을 예측하여 선행재하 성토고 및 압밀 완료 시점을 계산하고 실제 계측치와 비교·검토하는 것 또한 침하에서 매우 중요한 요소이다(Atkinson and Eldred, 1981; Das, 1993; Lambe and Whitman, 1969; Olsen, 1998).

실무에서 사용되고 있는 Terzaghi의 1차원 압밀이론(1943)에 의한 설계 침하량 추정 방법은 간편성과 적용 사례가 많다는 장점이 있으나, 가정 및 경계조건의 단순화로 인해 흙의 변형 특성의 복잡성과 지반의 불균질성, 압밀 이론의 제한 사항, 지반 정수 산정의 불확실성, 현장 시공조건 등의 반영에 대해 문제점을 내포하고 있다. 이로 인해 예측치와 실측치 사이에 상당한 차이를 가져오는 경우도 있다.

그래서 실무현장에서는 계측을 통해 지반의 침하 거동을 확인하고, 이를 바탕으로 향후 침하 거동을 예측하고 평가한다(Chung et al., 1999). 성토와 연직 배수재를 이용한 연약지반 개량 현장에서는 흔히 단계성토를 시행하게 되며, 적절한 성토고를 결정하기 위해서는 성토 변화에 따른 침하거동을 예측하는 것이 필요하다(천성호 등, 2011). 이를 위해 침하 계측 자료를 이용한 Hyperbolic 법, Asaoka법 등의 침하 예측 방법을 활용하고 있다. 하지만 이러한 방법들은 일정 성토고 조건에서만 적용이 가능하다는 단점을 가지고 있다. 또한 대상 현장의 지반조건과 계측조건 등에 따라 각 방법의 신뢰도에 많은 차이를 보이고 있어 엔지니어 입장에서 침하거동을 예측하는 방법의 선택에 있어 신중한 판단이 요구되고 있다.

따라서 연약지반 개량 현장의 효율적인 시공관리를 위해서는 성토고 변화에 따라 현장 계측자료를 이용하여 향후 침하량을 예측할 수 있는 좀 더 보편적인 새로운 침하량 예측 기법의 개발이 요구되고 있는 실정이다.



1.2 연구 동향

현장계측치를 이용한 침하량 예측 연구는 국내외에서 여러 연구자들에 의해 진행되어 오고 있다(Yoshikuni et al., 1981; Sirdharan, 1987). Asaoka(1984)는 현장계측 자료를 근거로 침하량 예측 방법을 일차원압밀방정식에서 처음으로 유도하여 제안하였다. Morrison et al.(1996)은 연직배수재를 설치하지 않은 지반에 Asaoka법을 적용하여 장래 침하 예측시 시간간격(Δt)에 따라 최종침하량 예측 결과가 상당한 차이가 나타남을 지적하고, 수정 Asaoka법을 제안하였다. Sridharan and Rao(1981)는 기존 Taylor방법과 Casagrade방법의 문제점을 지적하고, 침하량과 시간 사이의 직각 쌍곡선형 관계를 이용하여 압밀계수를 결정하는 방법을 제안하였다. Tan et al.(1991)은 Asaoka법과 Hyperbolic법을 비교하였는데 전자는 편미분 방정식에서 유도된 것으로 압밀침하가 1차원 압밀에서 멈춘다고 가정한 반면, Hyperbolic법은 실측 자료에 근거를 두고 제안된 방법이므로 2차 압밀을 포함하고 있어 더욱 정확하게 예측 가능하다고 하였다. 또한 Tan.(1993, 1994, 1995)은 실측 데이터를 선형회귀시킬 경우 나타나는 초기 기울기로 구한 총 침하량은 실제보다 과대 예측되는 경향이 있다고 주장하였으며, 쌍곡선에서 나타나는 압밀도 60%에 해당하는 점(U_{60})과 90%에 해당하는 점(U_{90})을 이용하여 최종침하량을 구하는 방법을 제안하였다(Tan and Chew, 1996).

한편, 국내의 경우 현장계측치를 이용한 침하량 예측법으로 최호광 등(1997)의 \sqrt{S} 법을 들 수 있다. 그는 기존 Hyperbolic법의 현장 적용성을 확보하기 위해서 압밀 침하량의 제곱근과 시간 관계를 쌍곡선적이라고 가정하고 접근을 시도하였다. 그 외에 많은 연구자들이 서해안과 남해안의 대형 매립공사나 그 이외의 많은 연약지반의 개량 공사에서 장기침하량 예측을 위하여 현장 계측 자료를 이용한 연구가 이루어지고 있다(김형주 & 원명수, 1996; 임성욱, 2007; 김승흠, 2007; 우상인 등, 2008; 추윤식 등, 2010).

지금까지 진행된 침하량 예측관련 연구에서 보면 각각의 방법이 서로 장점과 단점을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 다시 말해 대상 현장의 지반조건과 계측조건 등에 따라 각 방법의 신뢰도에 차이를 보인다. 예를 들어, Hoshino법은 계측 초기 불안정한 데이터의 영향이 매우 크게 나타나고, Asaoka법으로 예측

을 수행할 경우에는 일정한 시간 간격의 데이터가 요구되는데 계측 자료가 일정한 간격으로 얻어지지 않는 경우 예측의 객관성을 확보하기 어렵다는 것 등이다. 이와 같은 사실을 종합해 볼 때 좀 더 객관적인 침하량 예측법에 대한 연구가 필요하다.

또한 현재 사용되고 있는 침하량 예측 관련 대부분의 연구가 최종침하량에 집중되어 있다는 것이다. 기존 침하량 예측법들은 연약지반에 최종 성토 재하가 완료된 이후의 침하 계측 자료만을 이용하여 침하량을 예측하고 있다. 그러나 연약 지반 상에 성토를 할 경우에는 지반의 낮은 강도 때문에 성토 사면의 안정성 확보를 위하여 대부분은 단계성토를 계획하여 점진적으로 재하가 이루어지게 된다. 따라서 연약지반 개량 현장의 효율적 시공 관리를 위해서는 최종 성토고 조건이 아닌 초기 성토 단계에서 계측된 자료를 이용하여 다음 단계성토에 따른 침하량을 예측할 수 있는 방법이 필요한데 이에 대한 연구는 이루어지고 있지 않다.



1.3 연구의 목적

본 연구의 목적은 배수재가 적용된 연약지반에 대하여 성토 단계에 따른 현장 계측 자료 및 지반 조사 자료를 바탕으로 기존의 침하량 예측법의 단점을 개선한 보다 보편적인 침하량 예측법(Kang's법, 2nd-Hyperbolic법, 1-D Theory Simulation법)을 제안하고, 제안된 방법의 실무 적용성을 판단하는데 그 목적이 있다. 구체적인 연구 목적을 살펴보면 다음과 같다.

먼저, 기존 이론식을 바탕으로 새로운 침하량 예측법인 Kang's법, 2nd-Hyperbolic법, 1-D Theory Simulation법을 제안하는 것이다. 또한 Kang's법을 활용한 단계성토별 시간-침하량 예측법을 제안하는 것이다.

그 다음 현장 침하데이터를 이용하여 따른 장래침하량을 예측하고 그 예측된 장래침하량을 실제 현장에서 계측된 침하량과 상호 비교·분석하여 침하량 예측기법의 적용성과 타당성을 평가하는 것이다. 특히 새로 제시된 예측기법인 Kang's법, 2nd-Hyperbolic법, 1-D Theory Simulation법의 적용성과 한계를 분석하여, 이 후 현장에서 적용할 수 있는 가이드라인을 제시하는 것이다.

마지막으로 새로 제시된 Kang's법을 사용하여 단계성토 초기 현장 계측치를 이용하여 분석된 지반상수를 이용하여, 단계성토시 발생할 침하량을 예측하여 Kang's법의 단계성토 현장관리에 적용성을 검토하는 것이다.

1.4 연구 내용

본 연구는 기존의 침하량 예측법의 단점을 개선한 보다 보편적인 침하량 예측법을 제안하고, 제안된 방법의 실무 적용성을 판단하는 논문으로 논문의 각 장별 연구내용을 살펴보면 다음과 같다.

제 2 장에서는 기존의 연구 내용을 서술한 장으로 Hyperbolic법, Hoshino법, \sqrt{S} 법, Log S법, Asaoka법, Monden법 등의 침하예측법에 대한 이론적인 배경과 압밀도와 관련된 이론식(Barron식, Hansbo식, Yoshikuni식, Onoue식) 등이 소개 되었다. 그리고 점증재하를 고려한 압밀도 및 침하시간 계산이 설명되었다.

제 3 장에서는 연구 대상이 된 두 곳의 현장(화전, 미음지구)의 지형, 지질, 지층상태, 획득된 지반정수, 구역별 지반개량 현황, 계측기 설치 및 설치 현황이 설명되었다.

제 4 장에서는 새로 제시된 세 개의 예측법들이 설명되었다. Hansbo(1979; 1981)의 수평방향압밀해를 기본으로 한 Kang's법, Hyperbolic법을 개선한 2nd-Hyperbolic법, Terzaghi 1차원압밀이론을 이용한 1-D Theory simulation법 등이 구체적으로 소개되었다. 또한 Kang's법을 이용한 단계성토별 시간-침하량 예측에 대한 설명도 이루어졌다.

제 5 장은 새롭게 제시된 방법의 선행 검증단계로 1차원 압밀이론(Terzaghi's theory), 수평배수이론 및 유한요소해석 프로그램을 이용하여 산정된 시간-침하 곡선을 이용하여 새로 제시된 예측기법으로 최종침하량을 산정하여 그 결과 분석을 통해 새로 제안된 침하량 예측기법들의 경향성 및 장·단점을 분석하였다. 비교를 위해 기존 침하량 예측기법들의 결과도 같이 검토되었다.

제 6 장은 제안된 방법의 실제 적용 단계로 현장계측치를 이용하여 새로 제시된 침하 예측법들로 침하량을 예측하여 다른 기존 침하량 예측법처럼 사용이 가능한지를 상호 신뢰도 분석을 통해 검증하였다. 또한 초기 성토단계에서 계측된 시간-침하량 데이터를 Kang's법으로 분석하여 지반정수를 산정하여 다음 단계 성토시 발생할 시간-침하량 곡선을 도출하여 침하량을 예측하였다. 즉 제안된 Kang's법이 초기 성토 단계에서도 단계성토시 뿐만 아니라 최종 침하량

예측이 가능함을 확인하였다.

제 7 장은 결론으로 본 연구를 통해 얻은 결과 정리와 연구내용의 미흡한 점과 추후 연구 방향에 대한 언급이 이루어졌다.

연구의 전체적인 흐름은 Fig. 1.1과 같다.

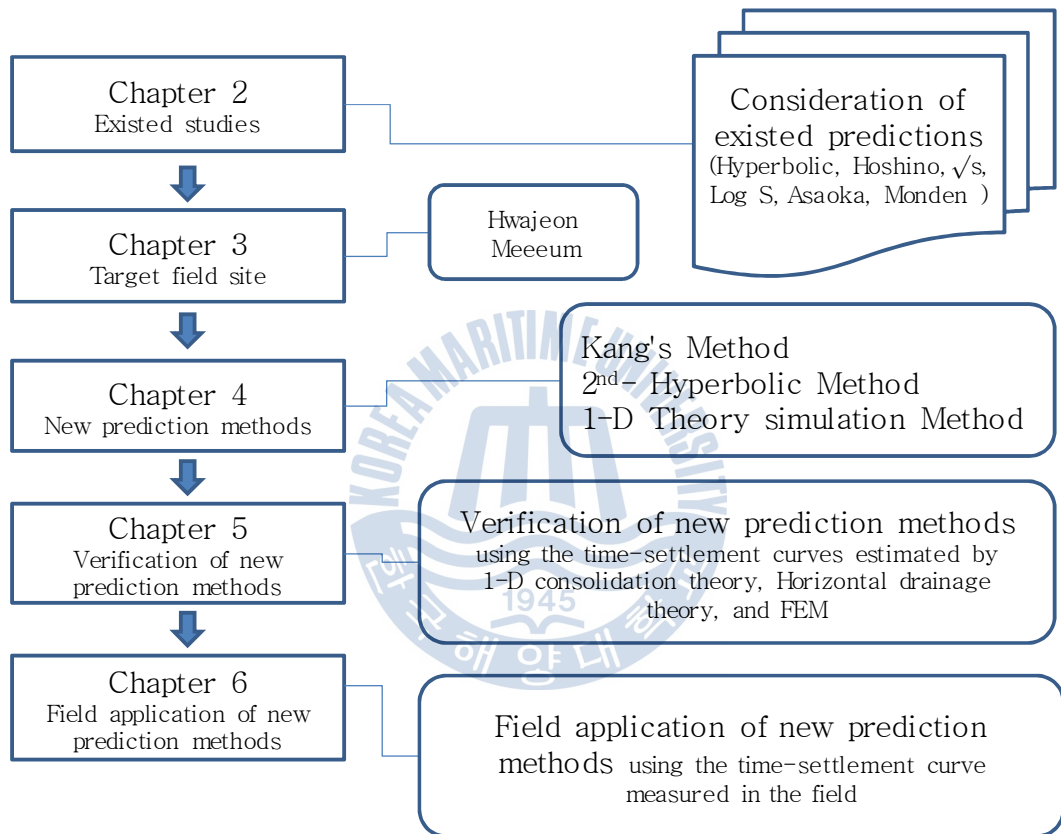


Fig. 1.1 Flowchart for study process

제 2 장 기존의 연구

2.1 침하예측기법

2.1.1 Hyperbolic법

침하가 Fig. 2.1와 같이 쌍곡선 형태로 감소해 간다는 가정에 근거하여 장래 침하량의 추정치로부터 침하량을 예측하는 방법이다. 이때 침하-시간 곡선은 식 (2.1)과 같은 관계로 나타난다.

$$S - S_i = \frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)} \quad (2.1)$$

여기서, t_i = 성토 완료 시점

S_i = 성토 완료 시점의 침하량

α = 축변환을 통한 기울기

β = 변환을 통한 y 절편

식 (2.1)을 Fig. 2.2에 나타난 바와 같이 축 변환하면 선형적인 관계를 얻을 수 있다. 이 관계로부터 α , β 를 구하면 임의의 시간 t 에서의 침하량과 최종침하량을 식 (2.2)와 식 (2.3)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$S_t = S_i + \frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)} \quad (2.2)$$

$$S_f = S_i + \frac{1}{\beta} \quad (2.3)$$

2.1.2 Hoshino법

Hoshino법(1962)은 Hyperbolic법을 수정한 것으로, \sqrt{t} 법이라고도 한다. 침하의 평균속도가 시간에 쌍곡선적으로 변하지 않으면 Hyperbolic법은 그 타당성이 결여된다. 실제 현장에서 측정한 자료들은 Hyperbolic법에 의해 Fig. 2.3과 같이 도시하였을 때, 직선이 아닌 곡선의 형태가 나타내는 경우가 빈번하게 발생한다. 이에 Hoshino법은 침하하는 시간의 평방근에 비례한다는 가정 하에 시간-침하의 관계를 Fig. 2.3과 식 (2.4)와 같이 정의한다.

$$S_t = S_i + \sqrt{\frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)}} \quad (2.4)$$

여기서, S_t : 성토 완료 후 임의의 경과시간(t)에서의 침하량

S_i : 성토 완료 직후의 침하량(초기침하량)

t : 전체 경과시간

t_i : 성토 완료 시점

α : y절편

β : 추세선의 기울기

Hoshino법의 적용과정은 Hyperbolic법과 동일하며, Fig. 2.3과 같이 $(t - t_i)/(s - s_i)^2$ 를 y축, 경과시간($t - t_i$)를 x축으로 도시하여 나타나는 선형의 y절편 α 와 기울기 β 를 구하고, 식 (2.4)로부터 시간-침하의 관계를 추정할 수 있다. 최종침하량은 식 (2.5)을 이용하여 구할 수 있다.

$$S_f = S_i + \frac{1}{\sqrt{\beta}} \quad (2.5)$$

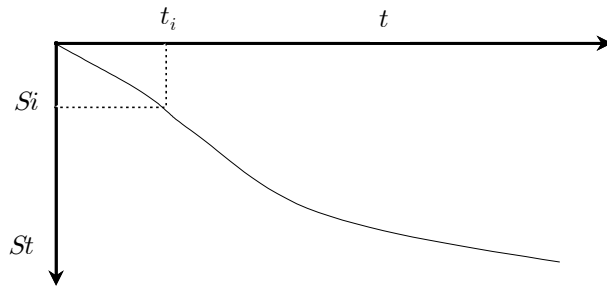


Fig. 2.1 Time - Settlement curve

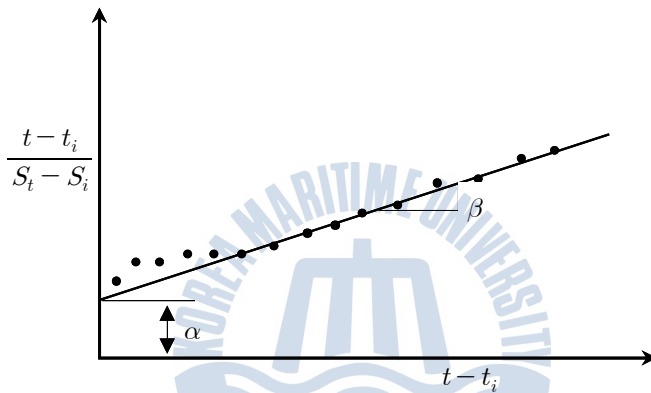


Fig. 2.2 Hyperbolic method: $(t - t_i)$ vs. $(t - t_i)/(S_t - S_i)$

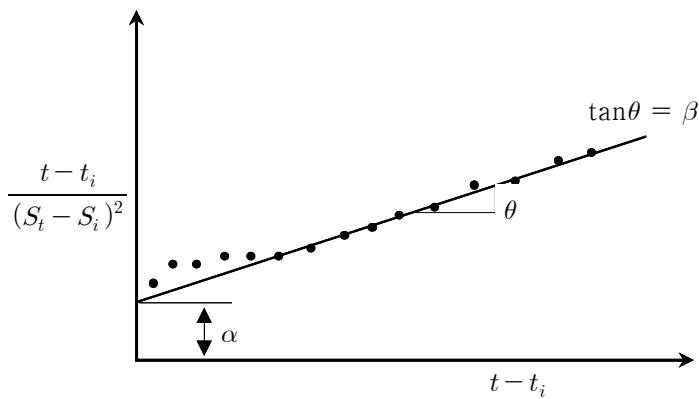


Fig. 2.3 Hoshino method: $(t - t_i)$ vs. $(t - t_i)/(S_t - S_i)^2$

2.1.3 \sqrt{S} 법

앞에서 설명한 Hyperbolic법을 보완하여 최호광 등(1998)에 의하여 제시된 방법으로 시간-침하 곡선이 식 2.6과 같은 관계를 갖는다는 사실을 이용하여 침하량을 산정하는 방법이다.

이때 시간-침하 곡선은 Fig. 2.4와 같이 축 변환 하여 선형 회귀할 수 있으며, Fig. 2.4의 관계에서 결정되는 α , β 값을 이용하여 임의 시간에서의 침하량과 최종침하량을 식 (2.6)과 식 (2.7)과 같이 계산 할 수 있다.

$$S_t = S_i + \left\{ \frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)} \right\}^2 \quad (2.6)$$

$$S_f = S_i + \frac{1}{\beta^2} \quad (2.7)$$

여기서, S_t : 성토 완료 후 임의의 경과시간(t)에서의 침하량

S_i : 성토 완료 직후의 침하량(초기침하량)

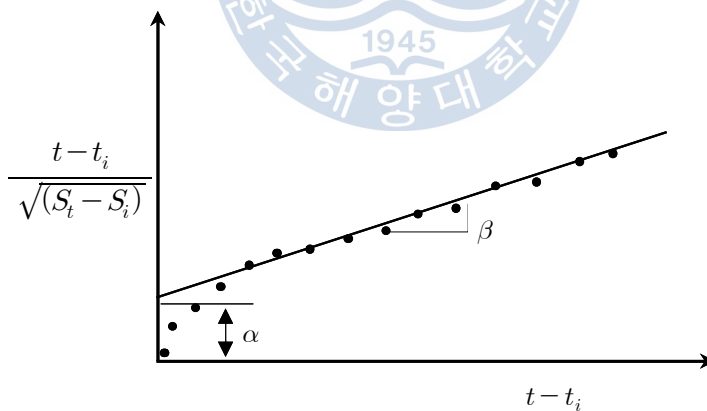


Fig. 2.4 \sqrt{S} method: $(t - t_i)$ vs. $(t - t_i) / \sqrt{(S_t - S_i)}$

2.1.4 Log S법

이 방법 앞에서 설명한 Hyperbolic법을 보완하여 제시된 방법으로 시간-침하 곡선이 식 (2.8)과 같은 관계를 갖는다는 사실을 이용하여 침하량을 산정하는 방법이다. 이때 시간-침하곡선은 Fig. 2.5와 같이 축 변환 하여 선형 회귀할 수 있으며, Fig. 2.5의 관계에서 결정되는 α , β 값을 이용하여 임의의 시간에서의 침하량과 최종침하량을 식 (2.8)과 식 (2.9)과 같이 계산 할 수 있다.

$$S_t = S_i + 10^{\frac{t-t_i}{\alpha + \beta(t-t_i)}} \quad (2.8)$$

$$S_f = S_i + 10^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.9)$$

여기서, S_t : 성토 완료 후 임의의 경과시간(t)에서의 침하량

S_i : 성토 완료 직후의 침하량(초기침하량)

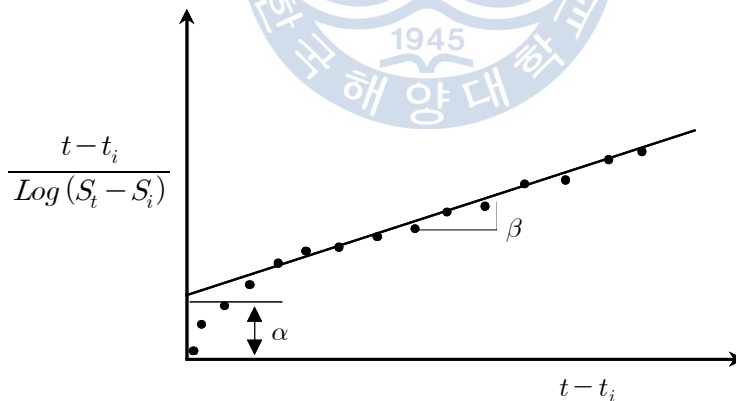


Fig. 2.5 Log S method: $(t-t_i)$ vs. $(t-t_i)/\text{Log}(S_t - S_i)$

2.1.5 Asaoka법

Asaoka(1978)는 Mikasa(1965)에 의해 유도된 압밀방정식을 이용하여 장래 침하량 및 최종침하량을 산정하는 방법을 제시하였다. Mikasa의 압밀방정식은 과잉간극수압 대신 연직방향의 변형률을 사용하여 식 (2.10)과 같이 편미분방정식을 나타내었다.

$$C_v \frac{\partial^2 \epsilon_v}{\partial z^2} = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \quad (2.10)$$

식 (2.10)은 하중이 일정한 조건에서 상미분방정식의 급수형태로 식 (2.11)과 같이 근사화 할 수 있다.

$$S + a_1 \frac{dS}{dt} + a_2 \frac{d^2 S}{dt^2} + \dots + a_n \frac{d^n S}{dt^n} + \dots = b \quad (2.11)$$

여기서, S : 압밀침하량

a_1, a_2, \dots, a_n, b : 압밀계수와 토층의 경계조건에 의존하는 상수

식 (2.11)에 대한 n차의 회귀관계식은 식 (2.12)와 같다.

$$S_j = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j S_{j-1} \quad (2.12)$$

두 식의 1차 근사를 취하면, 식 (2.13) 및 식 (2.14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S + a_1 \frac{dS}{dt} = b \quad (2.13)$$

여기서, $a_1 = \frac{5}{12} \frac{h^2}{C_v}$

$$S_j = \beta_0 + \beta_1 S_{j-1} \quad (2.14)$$

여기서, S_j : 시간 t_i 에서의 침하량

S_{j-1} : 시간 t_{i-1} 에서의 침하량

β_0 : y절편

β_i : 추세선의 기울기

$t = \infty$ 일 때, $S_j = S_{j-1}$ 의 경계조건을 대입하면 Fig. 2.7과 같이 되며, 식 (2.15)에서 최종침하량을 구할 수 있다.

$$S_{total} = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad (2.15)$$

Asaoka 방법에 의한 침하량 산정의 개략적인 순서는 다음과 같다.

- ① 산술눈금으로 나타낸 계측 시간-침하량 곡선을 동일한 시간간격 Δt 로 나눈다. 수직배수재가 설치되었을 경우 Δt 를 줄여 사용한다(Fig. 2.6).
- ② S_{j-1} 과 S_j 축으로 이루어진 좌표계에 침하량 S_1, S_2, S_3, \dots 를 (S_{j-1}, S_j) 형태로 나타낸다. 또한 $S_{j-1} = S_j$ 가 되는 45° 직선을 그린다(Fig. 2.7).
- ③ 좌표계상의 점들을 지나가는 가장 근사한 직선(선형회귀)을 그린 후 45° 직선과 만나는 점이 최종침하량이 된다.

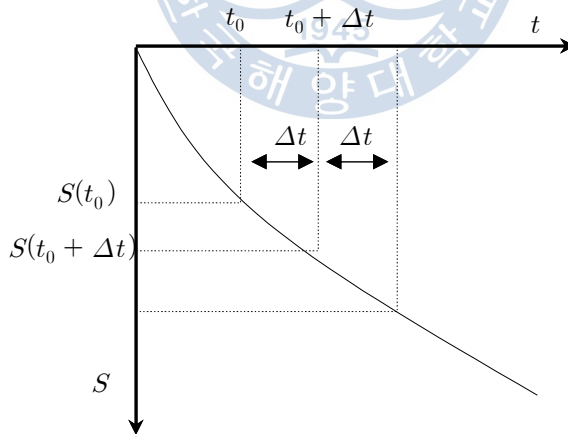


Fig. 2.6 Asaoka's method

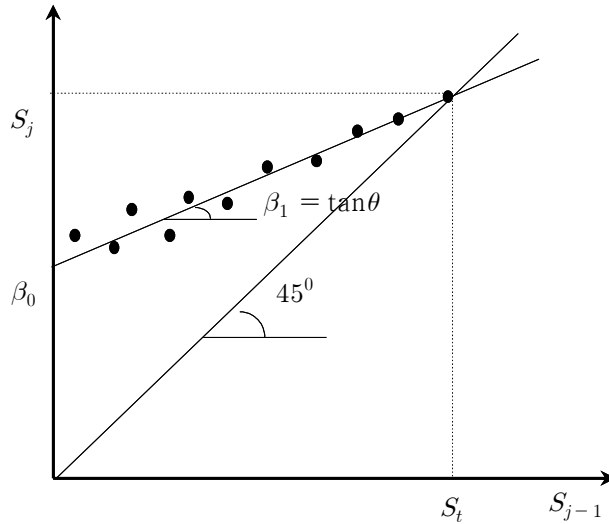


Fig. 2.7 Application of Asaoka's method

2.1.6 Monden법

기존 시간-침하 곡선을 통하여 전개된 이론과는 달리 Fig. 2.8과 같이 압밀도와 시간(t) 또는 시간계수(T) 관계를 기초로 t 또는 T_h 와 $\log(1-U)$ 의 선형관계를 찾고 이를 이용하여 최종침하량을 결정하는 방법이다.

U (압밀도)와 T (또는 t)의 관계는 연직 배수와 수평 배수 각각의 경우에 대하여 식 (2.16) 및 식 (2.17)의 관계로 표현된다. 특히 수평배수의 경우 식 (2.18)과 같은 선형 관계를 가진다.

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \cdot \exp(-M^2 T_v) \quad (2.16)$$

여기서, $M = \pi(2m+1)/2$, $m = \text{정수}$

$$U = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F(n)}\right) \quad (2.17)$$

$$\log(1-U) = 0.4343 \frac{8T_h}{F(n)} \quad (2.18)$$

Monden법에서의 침하량 산정 방법은 다음과 같다.

- ① 일정시간(t_j)에서의 측정 침하량(S_j)에 해당하는 압밀도(U_j) 가정
- ② 측정된 침하량과 시간에 대한 압밀도를 평가하여 $t - \log(1 - U)$ 그래프 결정
- ③ 가정한 U_j 가 Fig. 2.8과 같이 선형 관계를 보이면 침하량을 결정하고 그렇지 않으면 U_j 들 다시 가정
- ④ 최종침하량 결정 $S_{ult} = \frac{S_j}{U_j}$

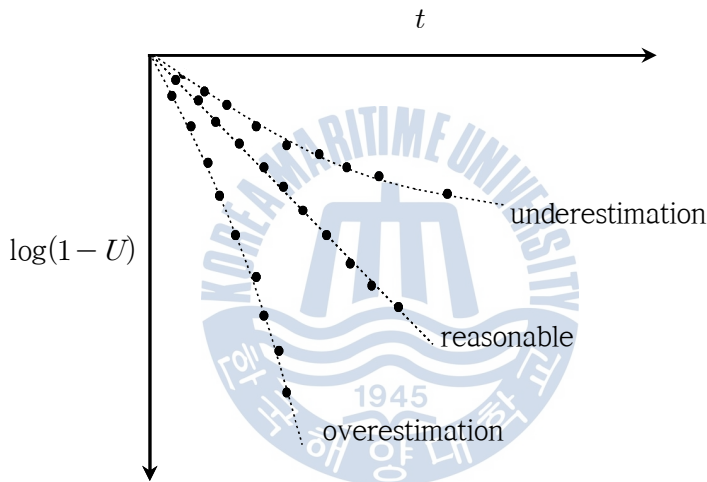


Fig. 2.8 Moden method: t vs. $\log(1 - U)$

2.1.7 비선형회귀법

기존의 Hyperbolic법을 포함한 \sqrt{S} 법 및 LogS법의 경우는 시간-침하량 그래프에서의 작은 떨림이 축 변환하여 나타낼 때에 매우 큰 오차를 발생시킬 수 있다. 또한 Hoshino법은 축변환을 수행할 때에 초기 불안정한 데이터의 영향이 매우 크게 나타나며, 축 변환시 β 값이 (-)값으로 산정되는 경우가 빈번하여, 예측이 불가할 경우가 많다. Monden법은 기존의 방법에서 현재 압밀도를 1%부터 99%까지 1%간격으로 총 99가지에 대해서 해석을 수행하고 직선성이 가장

좋은 압밀도를 선택하므로 정확도가 비선형회귀법에 비해 떨어진다. Asaoka법으로 예측을 수행할 경우에는 일정한 시간 간격의 데이터가 요구되지만 계측 자료를 일정한 간격으로 얻기 힘들기 때문에 일정 시간간격의 Data를 얻기 위하여 보간을 수행하는 것은 시간-침하 곡선을 임의적으로 변경하는 것일 수도 있다. 이러한 이유로 Asaoka 방법의 적용시 객관성을 확보하는데 어려움이 있다.

비선형회귀법은 앞에서 설명한 것처럼 여러 방법들이 축 변환하여 선형회귀하는 과정에서 정규화된 데이터에서 벗어나는 초기 데이터로 인하여 발생하는 오차를 줄일 수 있는 방법이다. 왜냐하면 앞에서 제시한 방법들은 시간-침하 곡선을 한 번의 축 변환을 통하여 계수 α, β 를 결정하고 침하량을 결정하기 때문이다. 비선형회귀법은 선형회귀법과 것과 달리 계측 데이터인 시간-침하 곡선을 반복적인 비선형 회귀를 통하여 각 예측기법에 따른 최적의 계수 α, β 를 결정하여 침하량을 결정하는 방법이다. 사용되는 식은 다음과 같다.

가. Hyperbolic법

$$S - S_i = \frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)} \quad (2.19)$$

나. Hoshino법

$$S - S_i = \left(\frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)} \right)^{0.5} \quad (2.20)$$

다. \sqrt{S} 법

$$S - S_i = \left(\frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)} \right)^2 \quad (2.21)$$

라. Log S법

$$S - S_i = 10^{\frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)}} \quad (2.22)$$

마. Asaoka법

$$S = \beta^{(t-t_i)/t_{space}} \left(S_i + \frac{\alpha}{\beta-1} \right) - \frac{\alpha}{\beta-1} \quad (2.23)$$

여기서 : t_{space} 는 Asaoka의 데이터 시간 간격

바. Monden법

$$S = S_t (1 - 10^{\alpha + \beta t}) \quad (2.24)$$

여기서 : S_t 는 최종 침하량



2.2 압밀도 산정

연직배수공법은 배수재를 지반에 타입하여 점성토층의 배수거리를 짧게 하여 압밀침하를 촉진시켜 짧은 기간에 지반을 안정시키는 방법으로 대표적인 공법으로는 과거에는 모래를 배수재로 많이 사용하였으나 현재는 prefabricated vertical drain 배수재를 많이 사용하고 있다(Bergado et al., 1993; 1996; Bo, 2004; Bellezza and Fentini, 2008; Tripathi and Nagesha, 2010). 배수재가 적용된 지반에 대해 압밀도와 관련된 많은 연구가 진행되었으며(Berry and Wilkinson, 1969; Tsytovich et al., 1971; Lo, 1991) 대표적인 식을 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1 Barron의 제안식

Barron(1948)은 Terzaghi의 압밀이론을 기본으로 해서 압밀층 전체에 대한 평균압밀도는 등변위압밀(equal strain consolidation)조건에서 다음 식 (2.25)와 같이 계산된다고 하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \quad (2.25)$$

여기서, U_h = 수평방향의 평균압밀도

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (d_e ; \text{영향원의 직경} \quad d_w ; \text{연직배수재의 직경})$$

$$T_h = \text{수평방향 시간 계수} ; \frac{C_h \cdot t}{d_e^2}$$

$$C_h = \text{수평방향의 압밀계수}$$

연직방향의 압밀도와 수평방향의 압밀도를 고려한 전 압밀층에 대한 평균압밀도는 다음 식 (2.26)으로 계산할 수 있다.

$$U_{v,h} = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \quad (2.26)$$

2.2.2 Hansbo의 제안식

Hansbo(1981)는 연직배수재의 설치시 지반이 교란되는 영향(smearing effect) 및 배수재의 흐름저항(well resistance)을 고려하여 임의의 깊이에서의 평균압밀도는 다음 식 (2.27)과 같이 계산된다고 하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F}\right) \quad (2.27)$$

여기서, $F = F(n) + F_s + F_r$

F = 드레인 간격 + smear zone + well resistance의 함수

$$F(n) = \ln\left(\frac{d_e}{d_w}\right) - \frac{3}{4}$$

$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right) \cdot \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right)$$

$$F_r = \pi z (L - z) \frac{k_h}{q_w}$$

d_s = 드레인 주위의 교란영역의 직경 (Hansbo: $d_s = 2d_m$ 적용)

d_m = cone casing의 직경

k_s = smear zone의 수평투수계수

k_h = 비교란 점토지반의 수평투수계수

d_w = 수직배수재의 직경

$$q_w = \frac{k_w \cdot \pi \cdot d_w^2}{4} = \text{드레인 통수능력}$$

k_w = 수직배수재의 투수계수

L = 드레인의 배수길이로 양면배수($L=H$), 단면배수($L=2H$) 구분

2.2.3 Yoshikuni의 제안식

Yoshikuni(1979)는 흐름저항의 영향만을 고려한 평균압밀도 계산식을 다음 식 (2.28)과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{m}\right) \quad (2.28)$$

여기서, $m = F(n) + 0.8L$ (well resistance 고려, smear effect 미고려)

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

H = 배수재 길이(양면:H/2, 일면:H)

$$L = \frac{32}{\pi^2} \cdot \frac{k_h}{k_w} \cdot \left(\frac{H}{d_w}\right)^2 = \text{well resistance계수}$$

2.2.4 Onoue의 제안식

Onoue(1988)는 투수성에 관계없이 smear zone과 well resistance효과를 고려할 수 있는 식을 Yoshikuni와 Nakanodo(1974)가 제안한 배수저항계수 L 을 사용하여 다음 식 (2.29)과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n') + 0.8L}\right) \quad (2.29)$$

여기서, $F(n') = \frac{(n')^2}{(n')^2 - 1} \ln(n') - \frac{3(n')^2 - 1}{4(n')^2}$

$$L = \frac{32}{\pi^2} \cdot \frac{K_h}{K_w} \cdot \frac{H^2}{d_w}$$

$$T_h = -\frac{F(n') + 0.8L}{8} \ln(1 - U_h)$$

$$n' = n S^{\eta-1}, \quad \eta = \frac{k_h}{k_s}$$

$$S = \frac{d_s}{d_w} \quad H=\text{배수재 길이(양면 : } H/2, \text{ 일면 : } H)$$

2.2.5 점중재하를 고려한 압밀도 및 침하시간 계산

실제 건설공사를 시공하는 경우에는 압밀시험과 같이 전하중을 순간적으로 재하하는 순간재하(instant loading)가 아니고 하중을 점진적으로 증가하여 최종 하중에 도달하는 점중재하(gradual increase loading)가 된다. 일반적으로 성토

또는 구조물을 축조하는 기간이 압밀시간에 비하여 매우 짧은 경우에는 근사적으로 순간재하를 취급하여 압밀과정을 계산하고 있으나, 재하과정 중에 일어나는 압밀을 무시할 수 없는 경우에는 점증재하로 취급하여 압밀을 해석해야 한다(윤찬영 등, 2007; 백승경, 2007). 시간-침하곡선의 수정방법은 Fig. 2.9와 같이 Terzaghi의 도해법으로 설명된다. $t=0$ 으로부터 $t=t_1$ 까지 정률로 점증재하하여 최종하중 P_f 에 도달한 후 방치되었다면, 순간 재하 P_f 에 의한 압밀침하 곡선을 그리고, 점증재하구간에서 임의시각 t 의 $1/2$ 에 해당되는 $t/2$ 점에서 내린 연직선과 순간 재하에 의한 침하곡선과의 교점을 A, A에서 수평선을 그어 t_1 에서 내린 연직선과의 교점을 B, 선 OB와 t 에서 내린 연직선과의 교점을 C라 할 때, C점은 t 시각의 압밀침하량에 해당되며, $0 \leq t \leq t_1$ 구간에서는 C점의 궤적이 점증재하에 의한 압밀침하 곡선에 해당되고, $t_1 \leq t$ 의 방치 구간에 대한 침하곡선은 순간 재하에 의한 침하곡선에 비하여 $t_1/2$ 시간만큼 지연된 침하로 표시된다.

재하기간 중($0 \leq t \leq t_1$)의 침하량은 식 (2.30)과 같다.

$$\begin{aligned} S_t &= m_v \cdot P_t \cdot U \cdot (t - t/2) \cdot H \\ &= m_v \cdot (t/t_1) \cdot P_f \cdot U \cdot (t - t/2) \cdot H \\ &= (t/t_1) \cdot S_f \cdot U \cdot (t - t/2) \end{aligned} \quad (2.30)$$

여기서, P_t : 점증 재하하중

P_f : 최종하중

방치 기간 중($t_1 \leq t$)의 침하량은 식 (2.31)와 같다.

$$S_t = S_f \cdot U \cdot (t - t/2) \quad (2.31)$$



– 23 –

제 3 장 연구대상 현장

3.1 화전지구

3.1.1 지형, 지질 및 지반정수

화전지구는 해안선에 인접한 매립지와 서낙동강 하구에 위치하고 있으며(Fig. 3.1), 낙동강을 경계로 북서쪽은 비교적 높은 산세의 급경사를 보이며, 대상지역의 오른쪽인 낙동강 하구에는 삼각주상의 충적지가 발달하였다.

수계는 대상지역과 맞닿은 서낙동강을 비롯하여 그 오른쪽에 위치한 평강천, 맥도강, 낙동강 등이 바다로 유입되는 남-북방향의 수계가 발달하고 이외에 동-서방향의 소지류 및 농업용수로가 분포하며, 수계형태는 산계의 방향과 밀접한 관계를 나타내며 수지상의 형태를 보이고 있다.

지질은 백악기 경상속의 상부 유천층군과 불국사관입암류로 대별되며, 유천층군은 퇴적초기에는 정상적인 퇴적상이 우세하였으나 안산암질 화산활동이 전개되었으며 휴화산기에 안산암질암류 상위에 응회질퇴적물이 퇴적되고 이후 유문암질 화산활동이 일어났으며, 화산활동에 따른 암상변화는 화산활동이 젊어짐에 따라 안산암-석영조면안산암 및 유문석영안산암-유문암으로 성분이 변화되었다. 불국사관입암류는 곳곳에 산재하는 각섬석화강섬록암, 흑운모화강암질의 심성암류와 여러 암층을 최종적으로 관입 분포하는 화강반암과 맥암류로 구성되어 있다

Fig. 3.2에서와 같이 지층상태를 살펴보면, 상부사질토층은 실트질 모래와 점토질 모래로 구성되어 5.2~11.9m의 층후를 가지고, N치는 0~24로 매우 느슨~중간 조밀 상태이며, 전지역에 전반적으로 분포되어 있다. 점성토층은 실트질 점토로 구성되어 3.9~44.5m의 층후를 나타내며, 남동측방향으로 갈수록 두껍게 분포하고, 평균 N치는 0~5로 매우 연약~연약한 연경도를 보인다. 하부 사질토

층은 자갈질 모래, 실트질 모래, 점토질 모래로 구성되어 1.0~22.0m의 층후를 가지고, N치는 0~44로 매우 느슨~조밀한 상태를 보인다.



Fig. 3.1 Location of Hwajeon site

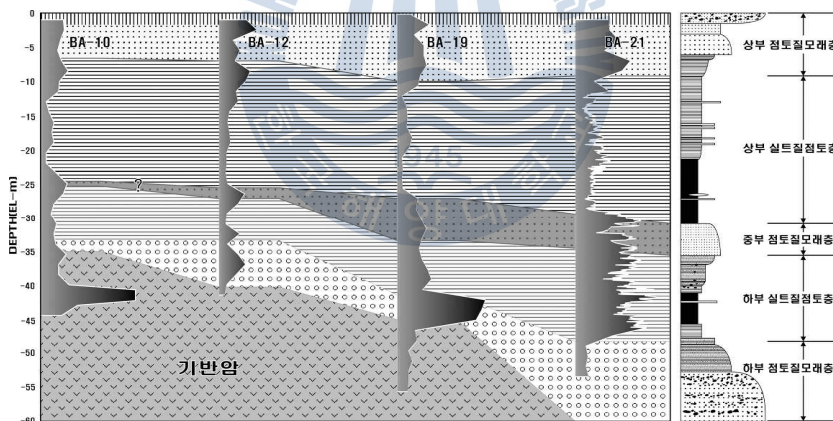


Fig. 3.2 Soil layer distribution of Hwajeon site

각 토층의 지반정수, 성토재 및 암반층 지반정수, 배수재 특성은 각각 Table 3.1, Table 3.2, Table 3.3과 같다.

Table 3.1 Soil parameters(Hwajeon site)

Classification		Symbol	Unit	Clay layer		
				Upper GL.(-) >20m	Middle GL.(-) 20~25m	Lower GL.(-) < 25 m
Mechanical characteristic	Saturated unit weight	γ_t	kN/m ³	16.6	16.1	18.0
	Submerged unit weight	γ'	kN/m ³	7.6	7.1	9.0
	Specific gravity	G_s	-	2.70	2.70	2.69
	OCR	-	-	1.02	0.99	0.95
Consolidation characteristic	Compression index	C_c	-	0.74	1.11	0.58
	Recompression index	C_r	-	0.09	0.13	0.07
	Initial void ratio	e_o	-	1.59	1.80	1.08
	Vertical consolidation coefficient	C_v	cm ² /sec	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	3.0×10^{-3}
	Horizontal consolidation coefficient	C_h	cm ² /sec	3.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}
	Horizontal permeability coefficient	k_h	cm/sec	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}	4.0×10^{-7}
Strength characteristic	Undrained shear strength	S_u	kPa	$S_u = 14.95 \times Z + 138.27$		
	Strength increment ratio	m	-	0.28		

Table 3.2 Fill and rock parameters(Hwajeon site)

Classification	Unit weight (γ_t , kN/m ³)	Cohesion c(kPa)	Angle of friction $\phi(^{\circ})$	Modulus of deformation (MPa)
Filling materials	19.0	5	25	20
Soft rock	20.0	50.0	40	100

Table 3.3 Characteristics of the prefabricated drain boards used in Hwajeon site

Classification	PVD	Remark
Diameter of effective drain (d_w , cm)	5.2	
Arrangement	Rectangle	
Diameter ratio of disturbance zone (S)	2.0	Diameter ratio of shoe plate
Reduction ratio of permeability coefficient (η)	$2(k_s/k_h=0.5)$	
Permeability coefficient of drainage materials (km, cm/sec)	1.0×10^{-1}	

3.1.2 구역 및 지반 처리 현황

아래 Table 3.4 및 Fig. 3.3은 현장 구역도(Zone) 및 연약지반 처리 현황이다. 구역은 연약 지층분포 등을 고려하여 구분하였으며, 연약지반 처리는 단지와 도로를 구분하여 계획하였다.

Table 3.4 Ground improvement depth for each zone(Hwajeon site)

Zone	Depth of ground improvement(m)				Remark
	Upper sand	Upper clay	Middle clay	Lower clay	
1	10.10	18.10	0.00	0.00	Industrial facilities lot
2	7.13	19.32	21.08	0.00	"
3-1	8.12	20.00	24.90	27.97	"
3-2	7.54	20.00	23.62	25.72	Supporting facilities lot
3-3	8.20	20.00	25.00	31.54	"
4-1	7.75	20.00	24.69	28.67	Commercial lot
4-2	7.75	20.00	25.00	32.38	Moving housing
4-3	8.43	20.00	25.00	32.08	Park lot
4-4	8.18	20.00	25.00	32.32	Industrial facilities lot
5-1	8.12	20.00	25.00	41.31	Moving housing
5-2	7.77	20.00	25.00	34.06	Commercial lot
5-3	8.96	20.00	25.00	32.12	Supporting facilities lot
6	8.10	20.00	25.00	40.80	"
7	8.44	20.00	25.00	42.74	"

3.1.3 계측기 설치 및 계측 현황

Table 3.5는 구역별 계측기 설치 현황을 보여주고 있으며, Fig. 3.4는 침하판 계측 데이터를 보여주고 있다.

Table 3.5 Status of the adopted monitoring system(Hwajeon site)

Symbol	Measurement	Quantity
⊥	Surface settlement	72
⊗	Multi-layer/piezometer (manual)	19
⊠	Multi-layer/piezometer (automatic)	2
⬢	Semiconductor type settlement	9
●	Water level indicator	6
◐	Inclinometer	20
▲	Surface settlement	50
△	Settlement pin (official use)	30
⊕	Tiltmeter/crack gauge	27/56
⊗	Pressure cell	3

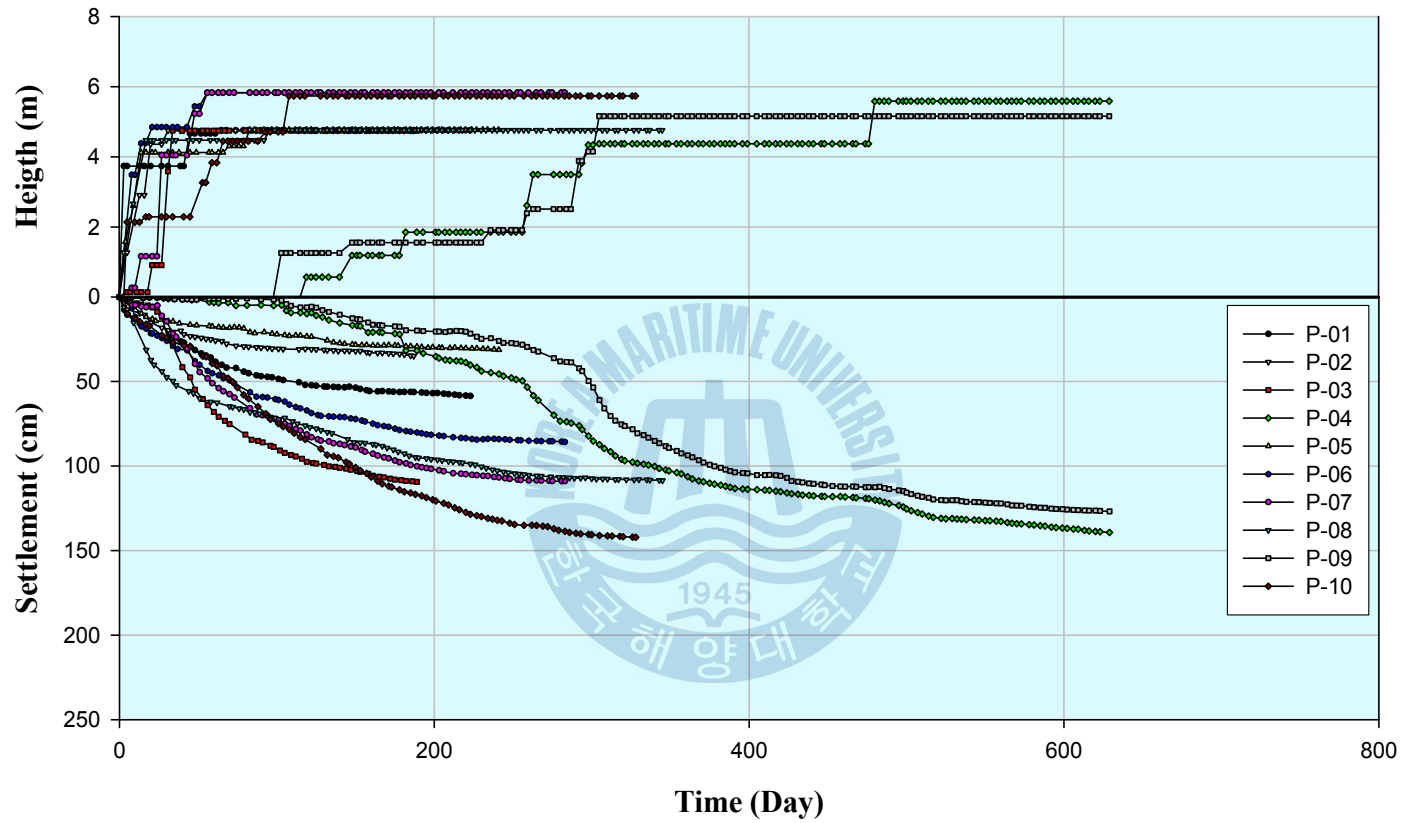


Fig. 3.4 Data of monitored settlement plate(Hwajeon site)

3.2 미음지구

3.2.1 지형, 지질 및 지반정수

미음지구는 행정구역상 부산광역시 강서구 녹산동(구랑, 미음, 범방마을)일원으로, 옥녀봉, 금병산, 풍산산, 세산, 봉화산 등을 정점으로 동서, 북서-남동 및 북동-남서방향의 산계들이 에워싸며, 부지 내부는 매봉산의 야산 및 충적평야를 형성되어 있다(Fig. 3.5). 인근의 낙동강 하류 및 서낙동강으로 유입되는 지류들이 발달하며, 북측에 합내천, 남측의 지사천과 구랑천이 필종하천으로 발달하였다.

지질은 중생대 백악기 경상누층군의 유천층군에 속하는 화산암류와 이를 관입하고 있는 불국사관입암류 그리고 이들 지층을 부정합으로 피복하고 있는 신생대 제4기 퇴적층(충적층 및 삼각주퇴적물)으로 구성하고 있다. 기반암은 중생대말~고제3기에 걸친 수차례에 걸친 격렬한 화성활동과 단층운동(“불국사조산운동”)의 영향을 받았던 지구조 환경이며, 지질구조는 외곽에 발달되어 있는 북북동-남남서 방향을 갖는 “양산 단층계”의 사이에 위치하며, 이와 관련하여 기반암에 파쇄대를 수반하고 있어 일부 구간의 기반암은 취약한 암질을 나타낼 것으로 추정된다.

Fig. 3.6에서와 같이, 지층상태를 살펴보면, 충적층은 모래, 점토 등으로 구성되며, 대부분 경작지로 이용되고 있으며, 하위에는 패각을 함유하는 모래, 점토, 자갈로 구성되는 연안, 삼각주 및 조간대 성인의 두꺼운 연약지반이 형성되어 있다. 경작지로 주로 이용되고 있는 매립층, 퇴적층(점토, 모래, 점토질모래, 자갈질 모래, 모래질자갈등), 풍화대층(풍화토, 풍화암), 기반암(연암)층의 순으로 분포하고 있다.

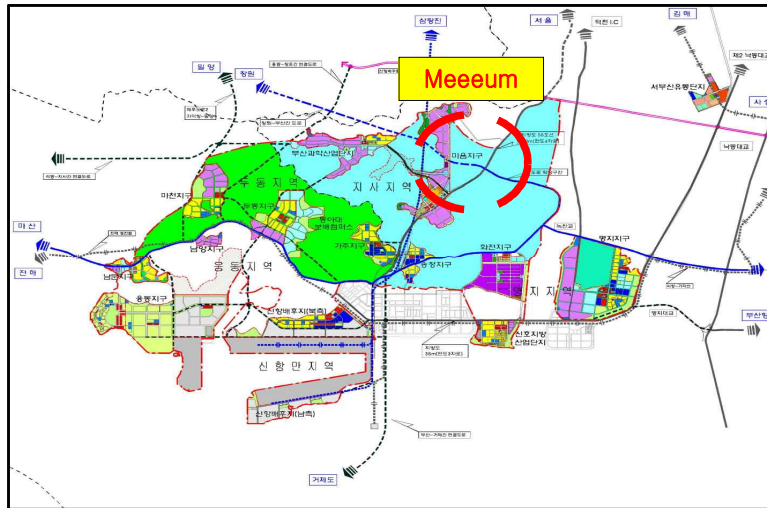


Fig. 3.5 Location of Meeum site

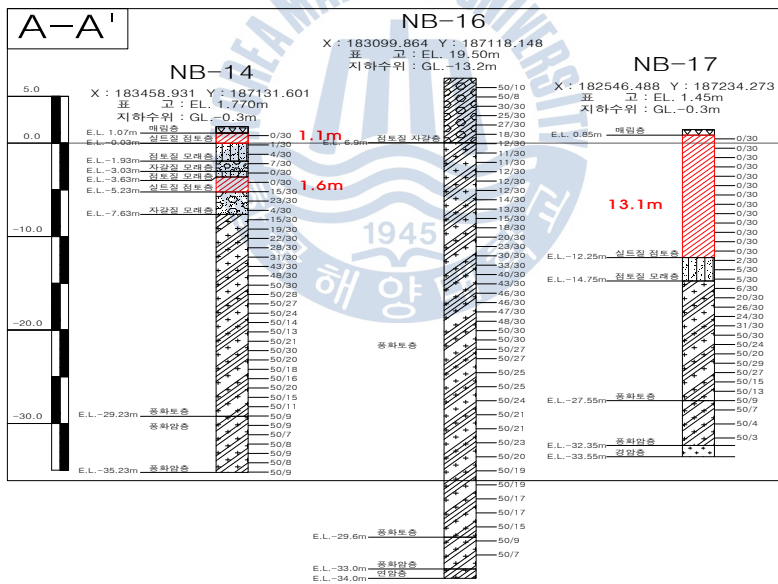


Fig. 3.6 Soil layer distribution of Meeum site

토층의 지반정수, 성토재 특성은 각각 Table 3.6, Table 3.7, Table 3.8과 같다.

Table 3.6 Soil parameters(Meeum site)

Classification		Symbol	Unit	Clay layer	
				G.L(±)0.0~ G.L(-)10m	G.L(-)10m below
Physical characteristic	Water content	ω_n	%	92	60
	Unit weight	γ_t	kN/m ³	15.0	16.0
	USCS	USCS	-	CH, CL, ML	
Consolidation characteristic	Initial void ratio	e_o	-	2.45	2.00
	Compression index	C_c	-	1.11	0.90
strength characteristic	Undrained shear strength	S_u	kN/m ²	14.0	26.8
	Strength increment ratio	m	-	0.28	0.30

Table 3.7 Design values of each zone(Meeum site)

Classification	Zone-1	Zone-2	Zone-3	Zone-4	Remark
Coefficient of vertical consolidation	1.18×10^{-3}	3.20×10^{-4}	3.00×10^{-4}	1.04×10^{-3}	(C_v , cm ² /sec)
Coefficient of horizontal consolidation	9.62×10^{-3}	2.61×10^{-3}	2.45×10^{-3}	8.48×10^{-3}	(C_h , cm ² /sec)
C_h / C_v	8.2	8.2	8.2	8.2	

Table 3.8 Unit weight of fill material(Meeum site)

Classification	Sand mat	Block	Road	Road Preloading
Unit Weight (kN/m ³)	17	18	19	18

3.2.2 구역 및 지반 처리 현황

아래 Table 3.9 및 Fig. 3.7은 현장 구역도(zone) 및 연약지반 처리 현황이다. 구역은 연약 지층분포 등을 고려하여 구분하였으며, 연약지반 처리는 단지와 도로를 구분하여 계획하였다.

Table 3.9 Description of the divided zones

Classification	Installation space of PVD	The reason for dividing zone
Zone 1-1	Not installed	The district with soft ground layer within 3m and filling height within 5m
Zone 1-2		The district with soft ground layer within 3m ~5m and filling height within 9m
Zone 2	1.7×1.7	The district with soft ground layer within 3m, filling height within 5m, sedimentary environment under shallow sea
Zone 3	1.5×1.5	The district has the most deepest soft ground and sedimentary environment under Jisa river and Gulang river
Zone 4	Not installed	The district where is influenced by mountain area has within 4m of soft ground layer and housing moving and high filling zones

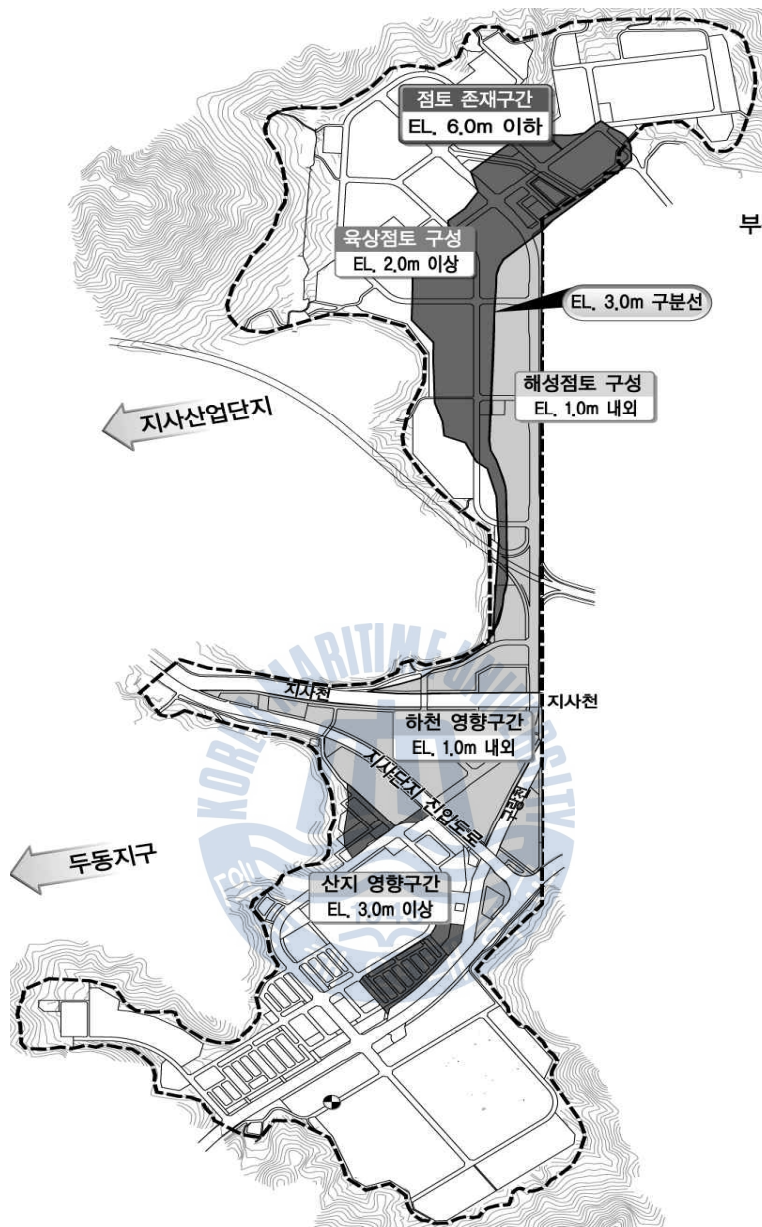


Fig. 3.7 Status of soft ground improvement(Meeum site)

3.2.3 계측기 설치 현황

Table 3.10은 구역별 계측기 설치 현황을 보여주고 있으며, Fig. 3.9는 침하판 계측 데이터를 보여주고 있다.

Table 3.10 Status of the adopted monitoring system(Meeum site)

Classification		Measurement	Quantity (EA)			
			Sum	Zone1	Zone2	Zone3
Inter block	Manual	Surface settlement	155	21	80	54
		Multilayer -settlement Piezometer Water level indicator	11	1	9	1
	Automatic	Multilayer -settlement Piezometer Water level indicator	3	-	2	1
Boundary	Stable managem ent	Inclinometer	22	0	17	5
		Water level indicator	18	0	14	4
		Displacement stake	29	0	25	4
Adjacent road zone		Surface settlement	1	-	1	-
Railroad behind abutment		Linear measurement	1	-	1	-
		Tiltmeter	2	-	2	-

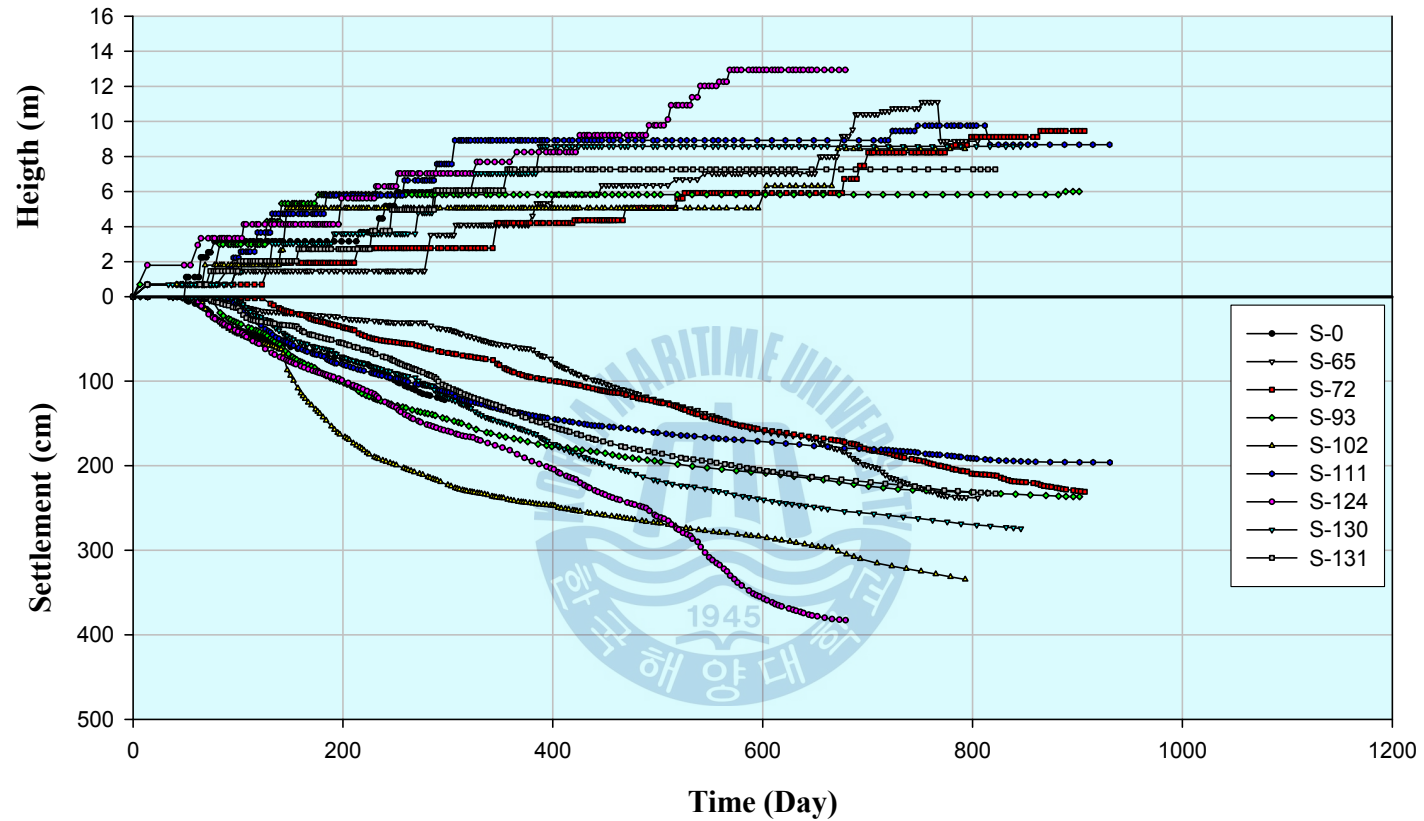


Fig. 3.8 Data of monitored settlement plate(Meeum site)

제 4 장 새로운 침하 예측기법

제안한 새로운 최종침하량 예측기법은 수평배수이론을 바탕으로 한 Kang's 법, Hyperbolic법을 변형한 2nd-Hyperbolic법, Terzaghi 일차압밀이론을 이용한 1-D Theory Simulation법 등이다. 특히, Kang's법을 적용하여 현장에서 성토 초기 단계에서 계측된 침하 데이터를 사용하여 단계성토별 시간-침하량 곡선을 예측할 수 있는 방안을 제시하고 한다.

4.1 Kang's법

일반적으로 연약지반 깊이가 깊고 배수재가 적용된 경우 연직방향 보다는 수평방향의 배수가 지배적으로 작용하여 압밀이 진행된다(Lee and Chung, 2010). 본 연구에서 제안된 Kang's법은 Hansobo(1981)의 수평방향압밀해, 식 (4.1)을 기본으로 한다.

$$U = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F}\right) \quad (4.1)$$

여기서, T_h = 수평방향 압밀계수

F = 저항계수로 배수간격항(F_n), 스미어항(F_s), 웰레지스텐스항(F_r)의 합($F = F_n + F_s + F_r$).

Lee and Chung(2010)은 배수간격항(F_n)과 스미어항(F_s) 저항은 몇 개의 개략적인 해들이 존재하는데 이들 사이의 차이(에러)는 무시할 수 있을 정도로 작다고 하였다(Bergado et al., 1992; Chai and Miura, 1999; Ghadeharioon et al., 2010; Hird and Moseley, 2000; Indraratna et al., 2002). 하지만 웰레지스텐스항(F_r)은 서로 다른 몇 개의 해가 존재하는 것으로 알려져 있다(Hansbo, 1979;

Hansbo, 1981; Onoue, 1988; Lo, 1991; Xie, 1987; Yoshikuni and Nakanodo, 1974).

압밀도와 침하량의 관계는 식 (4.2)와 같다.

$$U = \frac{S_t}{S_f} \quad (4.2)$$

여기서 S_f 는 최종침하량이고 S_t 는 임의 시간에서의 침하량이다. 식 (4.2)를 이용하여 식 (4.1)을 다시 표현하면 식 (4.3)과 같다.

$$S_t = S_f \left(1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F}\right)\right) \quad (4.3)$$

수평방향압밀시간계수(T_h)와 최종침하량(S_f)는 다음식과 같다.

$$T_h = \frac{C_h t}{H_d^2} \quad (4.4)$$

$$S_f = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \quad (4.5)$$

여기서, C_h = 수평방향압밀계수; t = 시간; H_d = 배수거리

C_c = 압축지수, e_0 = 초기간극비, H = 연약층 두께,

P_o = 초기 유효응력, ΔP = 증가응력(성토)

식 (4.4)와 식 (4.5)를 식 (4.3)에 대입하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$S_t = C_c \left(\frac{1}{1 + e} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \left(1 - \exp\left(-\frac{8}{H_d^2} \cdot \frac{C_h t}{F}\right) \right) \quad (4.6)$$

식 (4.6)을 상수 C_1 과 C_2 를 사용하여 다시 정리하면 지수함수로 표현된 임의 시간에서 침하량 산정식을 다음과 같은 식 (4.7)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_t = C_1 \cdot C_c (1 - \exp(-C_2 \cdot \frac{C_h \cdot t}{F})) \quad (4.7)$$

$$\text{여기서, } C_1 = \frac{1}{1+e} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$$

$$C_2 = -\frac{8}{H_d^2}$$

제시된 방법에서 C_1 과 C_2 는 현장의 시험 데이터를 이용하여 산정할 수 있는 상수이며, C_c , C_h 및 F 는 예측기법으로 얻어지는 함수 값으로 정의된다. 다만 초기 C_c , C_h 및 F 값은 각 현장에서 구한 시험 데이터를 이용한다. 이것은 현장의 지반 특성을 반영하는 것으로 해석의 신뢰성 확보하는 방안이라 판단된다. 또한 해석 시, 일반적인 상수 값의 범위를 두어 해석의 신뢰성을 높일 수 있다.

Kang's법의 특징을 정리하면, 기존 예측기법에서는 고려하지 않았던 현장 데이터를 이용하여 각 현장별 특성을 반영할 수 있다는 것이 가장 큰 특징이다. 또한 예측기법 해석을 통해 간접적으로 지반 정수를 얻을 수 있고, 역해석을 통해 지반특성과 배수재의 압밀특성 규명에도 활용할 수 있다.

4.2 2nd-Hyperbolic법

2nd-Hyperbolic법은 Hyperbolic법을 변형한 예측하는 기법으로 수식과 최종침하량은 각각 아래 식 (4.8) 및 식 (4.9)과 같다.

$$S_t = \frac{t}{\alpha_1 + \beta_1 \cdot t} + \frac{t}{\alpha_2 + \beta_2 \cdot t} \quad (4.8)$$

$$S_f = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \quad (4.9)$$

위 식들은 2차항까지만을 고려한 것으로 그 이상항 까지 고려시 결과에 별 차이가 나타나지 않는다.

2nd-Hyperbolic법은 Hyperbolic법 수행 시, Hyperbolic법에 의한 신뢰성이 낮은 경우 사용가능한 방법이다. 일반적으로 침하의 평균속도가 시간에 쌍곡선적으로 변하지 않으면 Hyperbolic법은 그 타당성이 결여된다. 실제 현장에서 계측된 자료들은 Hyperbolic법에 의해 도shi하였을 때, 직선이 아닌 곡선의 형태가 나타내는 경우가 빈번하게 발생한다. 이런 경우 Hoshino법에 의한 신뢰성이 Hyperbolic법보다 높게 나타난다.

2nd-Hyperbolic법의 기존 Hyperbolic법의 신뢰성을 개선한 방법으로 이 방법으로 예측된 값은 Hyperbolic법에 의해 예측된 값보다 신뢰도가 보다 높을 것으로 기대된다. 또한 2nd-Hyperbolic법은 현장의 구분 없이 거의 모든 현장 데이터를 분석할 수 있는 특징을 가지고 있다. 예를 들어 지층이 다양하게 구성되어 있는 현장의 경우에도 지층 특성을 반영하여 해석을 할 수 있는 방법이다.

4.3 1-D Theory Simulation법

1-D Theory Simulation법은 Terzaghi 1차원압밀이론을 이용하여 침하량을 예측하는 방법으로 총 3 가지 방법이다: 1) 압밀도 53% 이하에서 압밀도와 시간계수 이용한 1-D T.S. Method-1법, 압밀도 53% 이상에서의 압밀도와 시간계수 이용한 1-D T.S. Method-2법, Sivaram and Swamee식을 이용한 1-D T.S. Method-3법.

첫 번째 1-D T.S. Method-1법은 1차원압밀이론의 압밀도 53% 이하에서의 압밀도와 시간계수의 관계, $T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\bar{U}(\%)}{100} \right)^2$ 를 이용하여 침하량을 예측하는 방법으로 기본 수식은 아래 식 (4.10)과 같다.

$$\begin{aligned} S_f &= C_c \left(\frac{1}{1+e_0} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot H_d^2} \cdot c_v \cdot t} \\ &= C_1 \cdot C_c \sqrt{C_2 \cdot c_v \cdot t} \end{aligned} \quad (4.10)$$

여기서, $C_1 = \frac{1}{1+e} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$

$$C_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot H_d^2}}$$

두 번째 1-D T.S. Method-2법은 1차원압밀이론의 압밀도 53% 이상에서의 압밀도와 시간계수의 관계, $T_v = 1.781 - 0.933 \times \log(100 - U)$ 를 이용하여 침하량을 예측하는 방법으로 기본 수식은 아래 식 (4.11)과 같다.

$$\begin{aligned} S_t &= C_c \left(\frac{1}{1+e_0} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \left(1 - 10^{\left(0.0911 + \frac{1.0718}{H_d^2} \cdot c_v \cdot t \right)} \right) \\ &= C_1 \cdot C_c \left(1 - 10^{-0.0911 + C_2 \cdot c_v \cdot t} \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

여기서, $C_1 = \frac{1}{1+e} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$

$$C_2 = \frac{-1.0718}{H_d^2}$$

세 번째 1-D T.S. Method-3법은 Sivaram and Swamee식을 이용한 방법이다. Sivaram and Swamee(1977)는 0~100%의 다양한 평균압밀도(\bar{U})를 식 (4.12), (4.13)으로 제시하였다. 이 식은 시간계수 T_v 에 대해 기존의 Terzaghi 이론식과 비교하여 평균압밀도(\bar{U}) 0~90%에서는 1%보다 작은 오차를 가지며, 90%~100%에서는 3%보다 작은 오차를 가진다고 제시하였다. Table 4.1은 기존 Terzaghi 이론식과 Sivaram and Swamee식의 $T_v - \bar{U}$ 비교표를 보여주고 있다. 식 (4.12) 및 식 (4.13)의 관계를 이용하여, 최종침하량 예측 식으로 변환하면, 식 (4.14)과 같이 제안할 수 있다.

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\bar{U}(\%)}{100} \right)^2 \left/ \left(1 - \left(\frac{\bar{U}(\%)}{100} \right)^{5.6} \right)^{0.357} \right. \quad (4.12)$$

$$\bar{U} = \frac{(4 \cdot T_v / \pi)^{0.5}}{[1 + (4 \cdot T_v / \pi)^{2.8}]^{0.179}} \quad (4.13)$$

$$S_t = C_c \left(\frac{1}{1+e} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \frac{(4 \cdot c_v \cdot t / \pi H_d^2)^{0.5}}{[1 + (4 \cdot c_v \cdot t / \pi H_d^2)^{2.8}]^{0.179}} \quad (4.14)$$

$$S_t = C_1 \cdot C_c \frac{(C_2 \cdot c_v \cdot t)^{0.5}}{[1 + (C_2 \cdot c_v \cdot t)^{2.8}]^{0.179}}$$

$$\text{여기서, } C_1 = \frac{1}{1+e} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}, \quad C_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot H_d^2}}$$

Table 4.1 Comparison of $T_v - \bar{U}$ in Terzaghi and Sivaram and Swamee theories

Terzaghi				Sivaram and Swamee			
\bar{U}	T_v	\bar{U}	T_v	\bar{U}	T_v	\bar{U}	T_v
5	0.002	55	0.239	5	0.002	55	0.241
10	0.008	60	0.286	10	0.008	60	0.289
15	0.018	65	0.340	15	0.018	65	0.343
20	0.031	70	0.403	20	0.031	70	0.405
25	0.049	75	0.477	25	0.049	75	0.478
30	0.071	80	0.567	30	0.071	80	0.567
35	0.096	85	0.684	35	0.096	85	0.682
40	0.126	90	0.848	40	0.126	90	0.849
45	0.159	95	1.129	45	0.160	95	1.163
50	0.196	99	1.781	50	0.198	99	2.172



4.4 Kang's법을 이용한 단계성토별 시간-침하량 예측법

연약지반 현장에서는 성토 시 과도한 침하 및 지반 전단 파괴 우려로 인하여 계획된 성토를 일시에 재하하는 것이 어려우므로, 성토되어지는 지반의 특성에 맞게 한계 성토고를 구하여 단계적인 성토가 이루어지고 있는 실정이다. 앞서도 언급하였지만 지반정수 산정의 불확실성 및 현장 지층의 변화로 인해 이론식으로 구한 예상 침하량은 현장에서 발생하는 실제 침하량과 다소 상이할 수 있다.

기존의 예측기법들은 성토 완료 후 현장의 시간-침하량 곡선을 직접적으로 이용하여 단순 도해 또는 해석을 통해 최종침하량을 산정한다. 초기 현장계측치를 이용하여 단계별 성토에 대한 발생 시간-침하량 곡선 예측은 이루어지고 있지 않다. 왜냐하면 일반적으로 현장 지층은 지층 특성이 다른 여러 층으로 이루어져 있어 현장계측치를 이용한 역해석 결과를 이용하여 산정된 지반 상수에 대한 부분적 적용은 어렵기 때문이다. 그 외 여러 원인이 존재하는데, 초기 성토 단계시에는 일정한 성토고로 계측되어지는 기간이 매우 짧아 데이터 부재에 의한 신뢰성 있는 분석이 힘들다. 초기에는 성토고 변화가 많으며, 작은 성토 하중에 의한 침하량을 이용시 지하수위 또는 차량하중 등의 영향으로 예측값의 오차가 크게 나타난다. 초기 성토시에는 점성토 층의 압밀에 의한 침하보다는 사질토층 및 점성토층의 즉시 침하가 상대적으로 크게 발생하므로 침하 곡선 형태가 양호하지 않아 분석이 어려운 경향을 가진다. 장비 주행성 또는 타설 장비를 위한 복토 설치 시의 초기 침하를 일반적으로 현장 여건상 계측하기 어려워 해석에 반영되기 힘들기 때문이다.

여하튼 본 연구에서는 침하량 예측에 있어 현장에서 구한 지반 정수 및 지층을 해석에 도입하여 각 현장의 특성에 맞는 해석 상수를 이용하여, 가능한 근접해를 구할 수 있도록 접근하였다.

단계성토 계획에 따른 초기 성토고 재하 시, 현장에서 계측된 발생 침하를 이용하여, 앞에서 제시한 Kang's법을 이용하여 단계성토별 시간-침하량 곡선을 예측하여, 현장에서 이루어지는 토공 관리에 도움을 줄 수 있도록 하는 것이다.

단계성토별 시간-침하량 곡선 산정은 아래와 같은 절차에 따라 해석된다.

- 계측기 매설 지점의 현장 및 실내 시험을 통해 해석을 위한 초기 지반 정수 결정(Tables 4.2, 4.3)
- 계측기 매설 지점의 토질주상도를 참고로 압밀 또는 침하 지층 및 배수 거리 결정(Table 4.3)
- 초기 지반정수, 압밀층 두께 및 배수 거리를 이용하여 침하예측기법에 적용하여 역해석 지반 정수 결정(Tables 4.4, 4.5)
- 역해석 지반정수를 이용한 단계성토별 시간-침하량 곡선 및 최종 예측 침하량 산정(Tables 4.5, 4.6)
- 해석을 위한 흐름도는 아래와 같다.

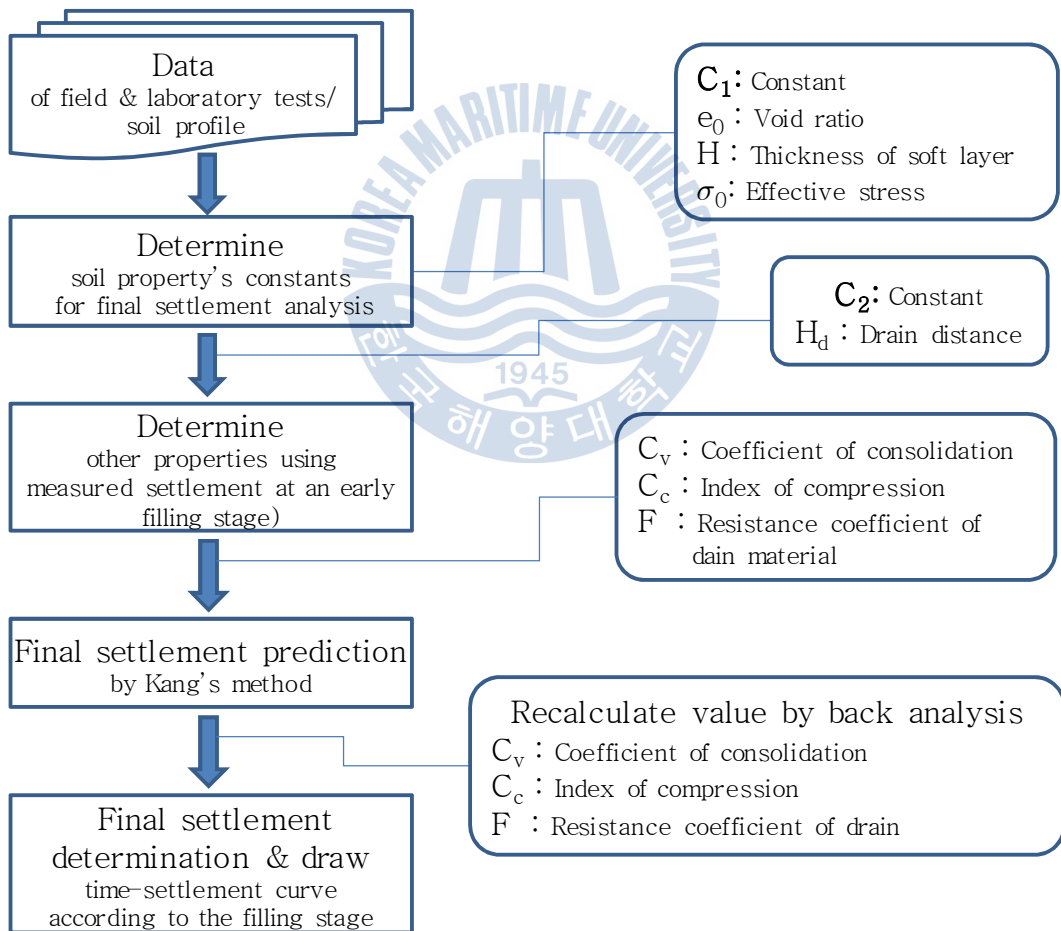


Fig. 4.1 Flowchart for Kang's Method

Fig. 4.2는 Kang's 법을 이용하여 역해석된 지반 정수를 이용하여 계산된 단계성토별 시간-침하량 곡선을 범용프로그램(Kconsol)과 비교한 결과를 도시한 것이다. 두 결과가 거의 일치하는 양상을 보여 Kang's 법의 신뢰성을 확인할 수 있다. Kang's 법에 대한 구체적인 검증은 다음 제 5 장과 제 6 장에서 보다 구체적으로 이루어졌다.

Table 4.2 Example of soil parameters determined by using field and laboratory tests

Classification		H (m)	G_s	e_0	C_c	c_v (cm^2/sec)	k_v (cm/sec)
1	Upper clay layer	11.9	2.70	1.59	0.740	3.00E^{-03}	2.00E^{-07}
2	Middle clay layer	5.0	2.70	1.8	1.110	1.50E^{-03}	2.00E^{-07}
3	Lower clay layer	15.8	2.69	1.08	0.580	1.50E^{-03}	4.00E^{-07}
4	Average	-	-	1.38	0.719	2.05E^{-03}	2.97E^{-07}

Table 4.3 In-situ vertical effective stress

Layer	Thickness (m)	γ_{sat} (tf/m^3)	σ (tf/m^2)	u (tf/m^2)	σ' or P_0 (tf/m^2)
Sand layer	8.10	1.78	14.42	8.10	6.32
Upper clay layer	3.00	1.76	24.27	9.60	14.67
	3.00	1.76	29.55	12.60	16.95
	3.00	1.76	34.83	15.60	19.23
	2.90	1.76	40.02	18.55	21.47
Middle clay layer	1.30	1.71	43.68	20.65	23.03
	1.30	1.71	45.91	21.95	23.96
	1.30	1.71	48.13	23.25	24.88
	1.10	1.71	50.18	24.45	25.73
Lower clay layer	4.00	1.90	54.92	27.00	27.92
	4.00	1.90	62.52	31.00	31.52
	4.00	1.90	70.12	35.00	35.12
	3.80	1.90	77.53	38.90	38.63

Table 4.4 Parameters of horizontal drainage theory(Hansbo, 1981)

Classification	Symbol	Unit	Calculated value	Remark
Space of drain	d	m	2.0	
Diameter of influence circle	d_e	m	2.256	Rectangle arrangement 1.128×2.00
Conversion diameter of drain	d_w	m	0.05	
Installation length of drain	L	m	41.0	
Permeability coefficient of drain well	k_w	cm/sec	0.1000	
Drainage capacity of drain well	q_w	cm ³ /sec	1.9630	
Diameter of casing	d_m	m	0.120	
Ratio of disturbance area	S	-	2	
Diameter of smear zone	d_s	m	0.240	$d_m \times 2.00$
Permeability coefficient in site / Permeability coefficient of smear zone	k_h/k_s	-	2	
Ratio of drain installation space	n	-	45.12	d_e / d_w
Influence factor by drain space, $F_n = \text{Ln}(d_e/d_w) - 3/4 = \text{Ln}(n) - 0.75$	F_n	-	3.059	In case of $n > 20$ Informality
Influence factor by smear effect $F_s = (k_h/k_s - 1) \times \text{Ln}(d_s/d_w)$	F_s	-	1.569	
Penetrated depth of drain	L	m	41.0	
Influence factor by well resistance $F_r = \pi \times Z(H-Z) \times k_h/q_w$: One side drainage $F_r = \pi \times Z(H/2-Z) \times k_h/q_w$: Both drainage	F_r	-	5.378	
Total influence factors $F = F_n + F_s + F_r$	F	-	10.01	

Table 4.5 Soil parameters for Kang's method

Classification	Symbol	Unit	Calculated value	Remark
Initial void ratio	e_o	-	1.376	Weighted average (Thickness consideration)
Thickness of clay layer	H	m	32.7	Rectangle arrangement 1.128×2.00
Effective surface load	σ'_0	tf/m ²	26.3	Middle of clay layer
Unit weight of filling	L	tf/m ³	1.900	
Filling height	k_w	m	6.02	Primary filling
Increment load	ΔP	tf/m ²	11.4	Primary filling load
Constant, C_1 $C_1 = \frac{1}{1+e_o} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$	C_1	m	216.2	Kang's method C_1
Constant, C_2 $C_2 = -8/D_e^2$	C_2	m ⁻²	2	Kang's method C_2
Compression index	C_c	-	0.719	<ul style="list-style-type: none"> Weighted average (Thickness consideration) Decided constant by Kang's method
Coefficient of horizontal consolidation	C_h	cm ² /sec	4.092E ⁻³	<ul style="list-style-type: none"> Weighted average (Thickness consideration) Decided constant by Kang's method
Final settlement, S_f $S_f = C_1 \cdot C_c$	S_f	m	155.50	<ul style="list-style-type: none"> Calculated Final settlement by Kang's method

Table 4.6 Time-settlement data by Kang's method

Staged filling	Height (m)	Filling load (t/m ²)	Filling period (Day)	Leaving period (Day)	Final settlement according to a period (cm)	Time - Settlement according to a period (cm)
1	1.049	1.9931	16	25	37.2	8.5
2	1.665	3.1635	10	4	54.0	6.9
3	3.309	6.2871	19	248	92.9	147.5
4	0.736	1.3984	14	390	18.5	39.7
Remarks	- Applied theory : horizontal drainage - Decision of back analysis constant by the Kang's method C_c : An existed value 0.719 \rightarrow change to 0.852 C_h : An existed value $4.092 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ \rightarrow change to $4.867 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ S_f : An existed value 155.5cm \rightarrow change to 202.6cm					

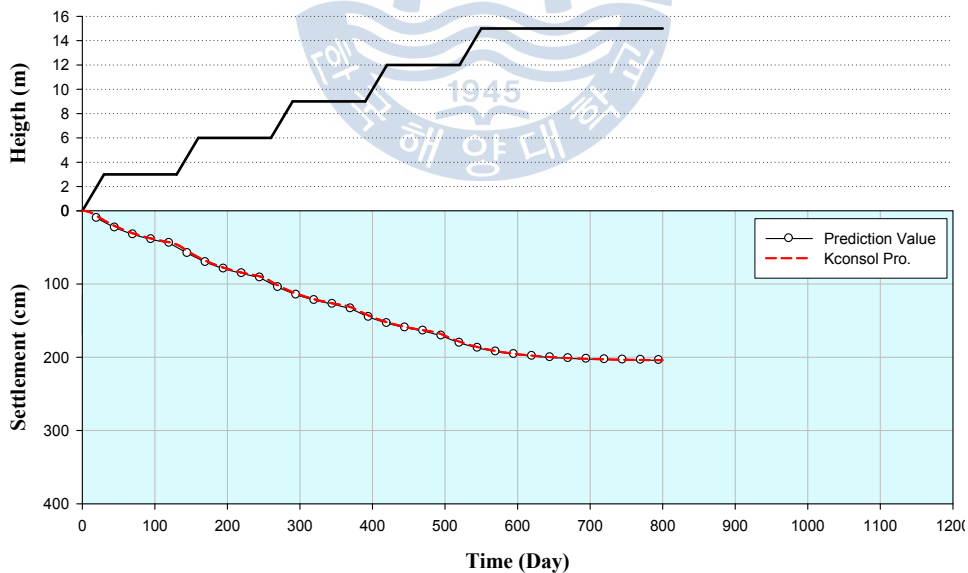


Fig. 4.2 Verification for settlement analysis according to staged filling between Kang's method and Kconsol program

4.5 요약

본 연구에서 제안한 최종침하량 예측기법은 수평배수이론을 바탕으로 한 Kang's법, Hyperbolic법을 변형한 2nd-Hyperbolic법, Terzaghi 일차압밀이론을 이용한 1-D Theory Simulation법 등이다. 제시된 3 가지 해석기법에 대해 정리하면 아래와 같다.

수평배수이론을 바탕으로 한 Kang's법의 특징을 정리하면, 기존 예측기법에서는 고려하지 않았던 현장 데이터를 이용하여 각 현장별 특성을 반영할 수 있다. 또한 예측기법 해석을 통해 간접적으로 지반정수를 획득할 수 있고, 역해석을 통해 지반특성과 배수재의 압밀특성도 규명할 수 있다.

단계성토 계획에 따른 초기 성토고 재하 시, 현장에서 계측된 발생 침하를 이용하여, 제시된 Kang's법을 이용하여 단계성토별 시간-침하량 곡선 예측은 먼저 계측기 매설 지점의 현장 및 실내 시험을 통해 해석을 위한 초기 지반정수 결정 후, 계측기 매설 지점의 토질주상도를 참고로 압밀 또는 침하 지층 및 배수 거리 결정하고, 초기 지반정수, 압밀층 두께 및 배수 거리를 이용하여 침하예측기법에 적용하여 역해석 지반정수를 결정한다. 그 다음 역해석 지반정수를 이용한 단계성토별 시간-침하량 곡선 및 최종 예측 침하량을 산정한다.

2nd-Hyperbolic법은 Hyperbolic법 수행 시, Hyperbolic법에 의한 신뢰성이 낮은 경우 사용가능한 방법이다. 일반적으로 침하의 평균속도가 시간에 쌍곡선적으로 변하지 않으면 Hyperbolic법은 그 타당성이 결여된다. 실제 현장에서 계측된 자료들은 Hyperbolic법에 의해 도시하였을 때, 직선이 아닌 곡선의 형태가 나타내는 경우가 빈번하게 발생한다. 이런 경우 Hoshino법에 의한 신뢰성이 Hyperbolic법보다 높게 나타난다. 2nd-Hyperbolic법의 기존 Hyperbolic법의 신뢰성을 개선한 방법으로 이 방법으로 예측된 값은 Hyperbolic법에 의해 예측된 값보다 신뢰도가 보다 높을 것으로 기대된다. 또한 2nd-Hyperbolic법은 현장의 구분 없이 거의 모든 현장 데이터를 분석할 수 있는 특징을 가지고 있다.

Terzaghi 1차원압밀이론을 이용하여 침하량을 예측하는 1-D Theory Simulation법으로 3가지 방법이 제안되었다: 압밀도 53% 이하에서 압밀도와 시간계수를 이용한 1-D T.S. Method-1법, 압밀도 53% 이상에서의 압밀도와 시간

계수를 이용한 1-D T.S. Method-2법, Sivaram and Swamee식을 이용한 1-D T.S. Method-3법 등이다. 이 중 Sivaram and Swamee(1977)식은 시간계수 T_v 에 대해 기존의 Terzaghi 이론식과 비교하여 평균압밀도(\bar{U}) 0~90%에서는 1%보다 작은 오차를 가지며, 90%~100%에서는 3%보다 작은 오차를 가진다.



제 5 장 침하량 예측기법 분석 및 검증

새로 제시된 예측기법에 대한 신뢰성 및 적용성에 대한 선행적인 평가를 위해 본 장에서는 1차원압밀이론(Terzaghi's theory), 수평배수이론 및 유한요소해석 프로그램으로 산정된 시간-침하량 곡선을 이용하여, 압밀도 50%, 60%, 70%, 80%, 90% 및 95%까지의 데이터를 이용하여 최종침하량을 산정하여 그 결과를 분석하였다. 유한요소해석프로그램에 의한 시간-침하량 곡선 산정에서는 Terzaghi's theory와 수평배수이론과 다르게 대변형 침하형태를 고려하였다.

5.1 1차원압밀이론 침하량을 이용한 예측

5.1.1 침하곡선 산정 조건

Terzaghi 1차원압밀이론에 근거하여 시간-침하량 곡선을 산정하였다. 곡선 산정 사용된 값 들은 Table 5.1과 같다.

Table 5.1 Values used for construction of the time-settlement curve by Terzaghi's theory

Classification	Input value	Unit	Remark
Initial void ratio, e_o	1.5	-	
Compression index, C_c	0.8	-	
Thickness of clay layer, H	15	m	One side drainage
Effective surface load, σ_{vo}'	12.75	t/m ²	
Increment load, ΔP	15.000	t/m ²	
Coefficient of consolidation, C_v	3.0×10^{-3}	cm ² /sec	
Coefficient of permeability, k_v	3.0×10^{-7}	cm/sec	
One dimensional consolidated settlement, S_f	162.12	cm	

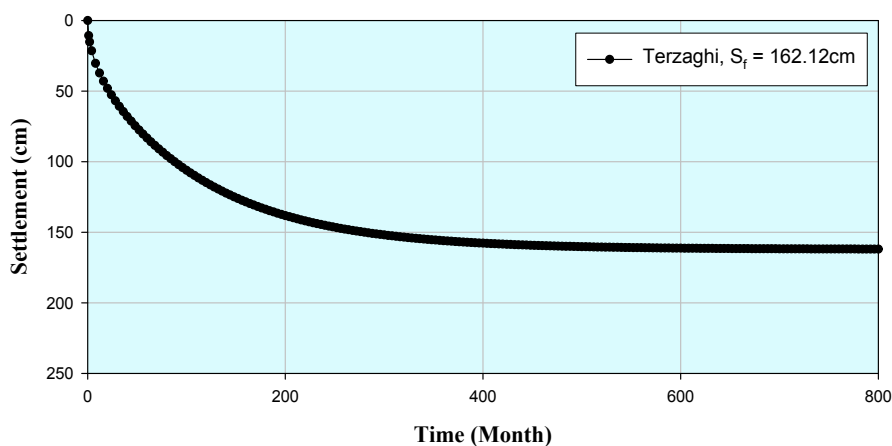


Fig. 5.1 Time - settlement curve proposed by Terzaghi's theory

제 4 장 4.3에서 1-D Theory Simulation법에서 제시된 3가지 방법으로 예측된 최종침하량 결과는 아래 Table 5.2과 Fig. 5.2와 같다.

Table 5.2 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory

Used data for analysis (U, %)	Settlement prediction(cm)		
	1-D T.S. Method-1 (U<53%)	1-D T.S. Method-2 (U>53%)	1-D T.S. Method-3 (Sivaram and Swamee eq.)
~ 50	162.1	82.5	295.0
~ 60	162.0	98.7	179.4
~ 70	161.7	112.4	165.8
~ 80	160.7	130.5	161.8
~ 90	157.7	144.8	161.7
~ 95	154.0	153.0	162.5

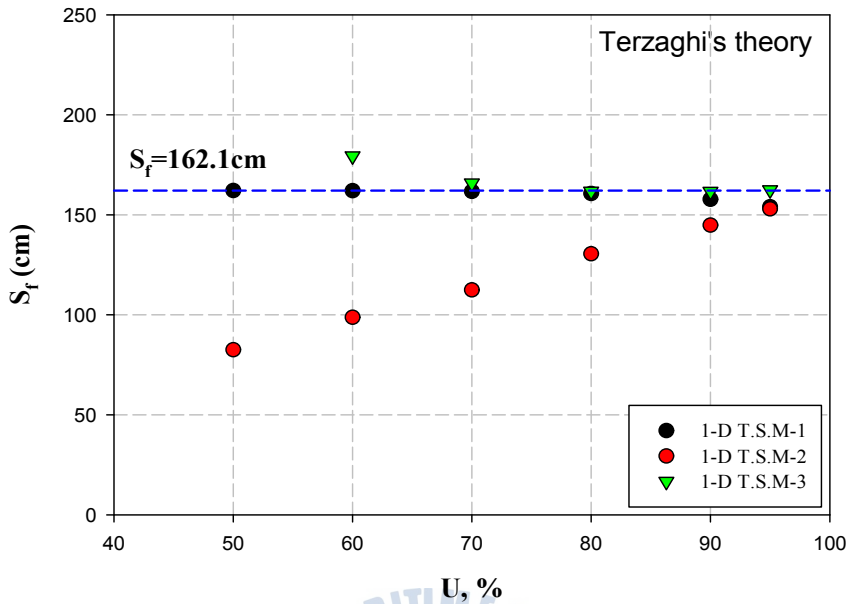


Fig. 5.2 Results of the final settlements predicted by 1-D Theory Simulation method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory

상기에서 제시한 압밀도(50, 60, 70, 80, 90, 95%) 변화에 따른 1-D Theory Simulation법의 3가지 방법으로 최종침하량을 구해 본 결과를 정리하면 아래와 같다.

1-D T.S. Method-1의 경우 (즉, 평균압밀도, \bar{U} 가 53% 이하 일 때의 $T_v - \bar{U}$ 관계를 이용) 평균압밀도, \bar{U} 의 변화에 따라 최종침하량 결과가 점차적으로 적게 산정되는 경향을 보이고 있다. 최종침하량 예측값은 Terzaghi's theory로 구해진 S_f , 162.12cm값을 초기에는 비슷한 값을 보이지만 압밀도가 커짐에 따라 작게 예측함을 보였다. 또한 Fig. 5.3(a)에서 보면 예측된 최종침하량 값보다 시간이 지남에 따라 더 큰 침하 곡선을 예측하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 평균압밀도 \bar{U} 53% 이하에서 이용되는 $T_v - \bar{U}$ 의 관계식이 압밀도 100%에서 수렴되어지는 식이 아니므로 예측에 있어 한계성을 가짐을 알 수 있다.

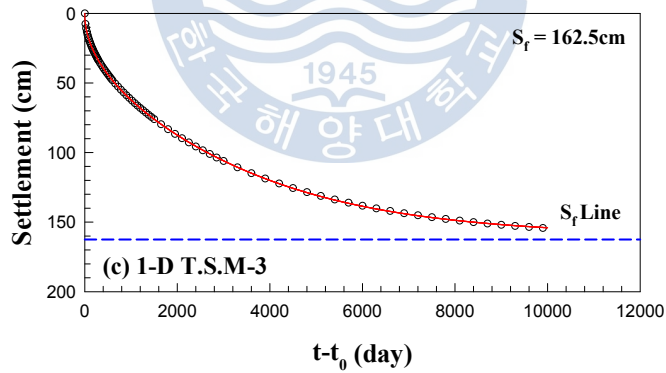
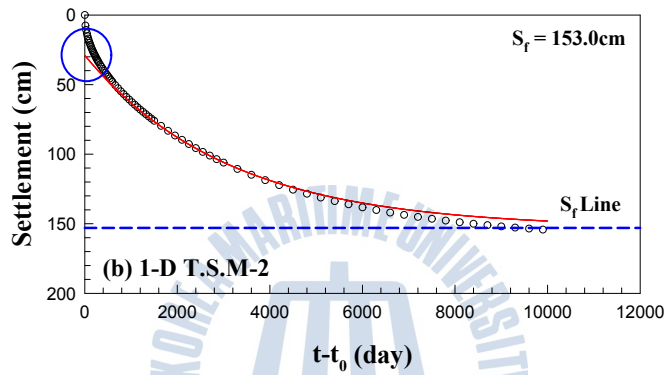
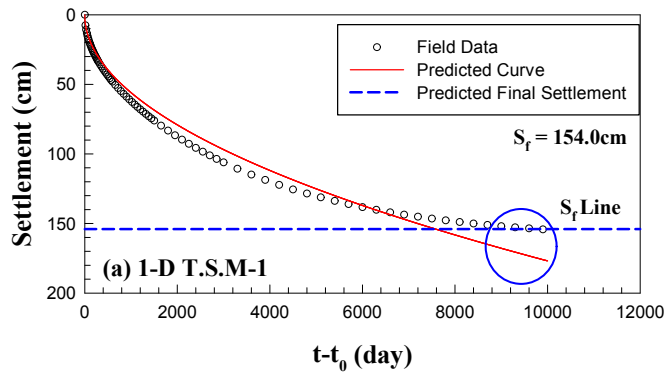
1-D T.S. Method-2의 경우 (즉, 평균압밀도, \bar{U} 가 53% 이상 일 때의 $T_v - \bar{U}$

관계를 이용) 평균압밀도, \bar{U} 의 변화에 따라 최종침하량 결과가 점차적으로 크게 산정되는 경향을 보이고 있다. 최종침하량 예측값은 Terzaghi's theory로 구해진 S_f , 162.12cm보다 전체적으로 작은 값을 보였다. 또한 Fig. 5.3(b)에서 볼 수 있듯이 초기 $t=0$ 일 때의 예측값이 0이 아니며, 침하 초기 시점에서의 예측값이 매우 불합리함을 알 수가 있다.

1-D T.S. Method-3의 경우(즉, Sivaram and Swamee(1977)가 제시한 $T_v - \bar{U}$ 관계를 이용) 평균압밀도, \bar{U} 의 변화에 따라 최종침하량 결과가 점차적으로 적게 산정되는 경향을 보이고 있다. 최종침하량 예측값은 Terzaghi's theory로 구해진 S_f , 162.12cm보다 처음에는 큰 값을 예측하다가 평균압밀도, \bar{U} 가 커질수록 이론값에 근접한 결과를 보이고 있다. 또한 Fig. 5.3(c)에서와 같이 신뢰성이 매우 높음을 알 수 있다.

각 평균압밀도 별 침하량 예측 결과는 부록 B에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.





Terzaghi 1D ($U < 95\%$)

Fig. 5.3 Results of analysis predicted by three methods of 1-D Theory Simulation method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory

3가지 방법에 따른 예측침하량을 분석할 결과, 1-D T.S. Method-3에 의한 방법이 가장 신뢰성이 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이후 1-D T.S. Method-3를 1-D Theory Simulation법으로 채택하여 앞으로의 분석에 이용하였다.

1-D Theory Simulation법의 적용에 앞서 제안식에 이용되어지는 C_1 과 C_2 의 파라메타 연구를 수행하였다. C_1 과 C_2 상수에 가장 큰 영향을 미치는 침하층의 두께(H) 및 간극비(e_0)를 변화시켜 침하량 예측을 수행하였다. Table 5.3과 Table 5.4는 각 각 해석에 이용된 침하층의 두께(H) 및 간극비(e_0)의 변화에 따른 C_1 과 C_2 상수이다.

Table 5.3 Values of C_1 and C_2 according to variation of the settlement layer(H)

H(m)	C_1	C_2
1	13.5101	11.00079
3	40.5303	1.22231
5	67.5506	0.44003
10	135.1011	0.11001
15	202.6517	0.04889
20	270.2022	0.02750
30	405.3034	0.01222
50	675.5056	0.00440

Table 5.4 Values of C_1 and C_2 according to variation of the initial void ratio(e_0)

e_0	C_1	C_2
0.4	361.9	0.04889
0.7	298.0	0.04889
1.0	253.3	0.04889
1.2	230.3	0.04889
1.5	202.7	0.04889
1.7	187.6	0.04889
1.9	174.7	0.04889
2.1	163.4	0.04889

Table 5.5와 Fig. 5.4 및 Table 5.6과 Fig. 5.5는 각각 침하층의 두께(H) 및 초기간극비(e_0) 변화에 따른 1-D Theory Simulation법에 의한 예측 침하량 산정 결과이다. 1-D Theory Simulation법에 의한 침하층의 두께(H) 및 초기간극비(e_0) 변화에 따른 예측 침하량 산정 결과를 분석해 보면 다음과 같다.

침하층의 두께 $H=15.0\text{m}$ 를 기준으로 산정된 시간-침하량 곡선을 이용하여, 침하층의 두께(H) 변화에 따른 예상 침하량 산정 결과, $H<10.0\text{m}$ 및 $H=50.0\text{m}$ 조건에서는 전 평균압밀도 구간에서 예상 침하량을 과대하게 평가하였으나, 평균압밀도 $\bar{U}>60\%$ 구간 및 $H=10.0\sim30.0\text{m}$ 에서는 H 변화와 무관하게 이론침하량에 거의 유사한 값을 예상하였다. 각 평균압밀도 별 침하층 두께(H)에 따른 침하량 예측 결과는 부록 C에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.

초기간극비, $e_0=1.5$ 를 기준으로 산정된 시간-침하량 곡선을 이용하여, 초기간극비(e_0) 변화에 따른 예상 침하량 산정 결과, 평균압밀도 $\bar{U}<60\%$ 구간에서만 이론침하량보다 예측침하량이 과대하게 평가 되었으며, $\bar{U}>60\%$ 구간에서 초기간극비 변화와 무관하게 이론침하량에 거의 유사한 값을 예상하였다. 각 평균압밀도 별 초기간극비(e_0)에 따른 침하량 예측 결과는 부록 D에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.

상기의 결과를 종합해 볼 때, 1-D Theory Simulation Method법의 상수 C_1 , C_2 에 가장 큰 영향을 미치는 현장의 침하층의 두께(H)를 어느 정도 정확하게 아는 것이 바른 최종침하 예측을 위해서 꼭 필요하리라 판단된다.

Table 5.5 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the depth of settlement layer(H) using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory

Used data for analysis (U, %)	Settlement prediction(cm)								Remark
	H=1.0m	H=3.0m	H=5.0m	H=10.0m	H=15.0m	H=20.0m	H=30.0m	H=50.0m	
~ 50	2,553.0	13,236.3	398.5	354.3	295.0	354.4	324.3	547.8	Based on the time-settlement curve for H=15.0m
~ 60	2,464.7	11,677.1	23,135.9	179.4	179.4	179.4	324.0	547.4	
~ 70	2,396.8	10,769.0	28,394.3	165.8	165.8	165.8	165.8	546.2	
~ 80	2,322.3	10,003.6	23,820.4	161.7	161.8	161.8	161.8	541.9	
~ 90	2,200.0	9,072.3	20,115.1	161.7	161.7	161.7	161.7	527.1	
~ 95	2,086.1	8,385.7	18,046.9	162.5	162.5	162.5	162.5	489.0	
Method of analysis	- Settlement curve proposed by using the 1-dimensional consolidation theory(Terzaghi’s theory). - The final settlement : 162.12cm. - Calculation of a final settlement according to degree of consolidation(50, 60, 70, 80, 90, 95%).								

Table 5.6 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the initial void ratio(e_0) using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory

Used data for analysis (U, %)	Settlement prediction(cm)								Remark
	e ₀ =0.4	e ₀ =0.7	e ₀ =1.0	e ₀ =1.2	e ₀ =1.5	e ₀ =1.7	e ₀ =1.9	e ₀ =2.1	
~ 50	263.8	289.6	315.9	341.3	295.0	294.9	254.0	303.3	Based on the time-settlement curve for e ₀ =1.5
~ 60	179.4	179.4	179.4	179.4	179.4	179.4	179.4	179.4	
~ 70	165.8	165.8	165.8	165.8	165.8	165.8	165.8	165.8	
~ 80	161.8	161.8	161.8	161.8	161.8	161.8	161.8	161.7	
~ 90	161.7	161.7	161.7	161.7	161.7	161.7	161.7	161.7	
~ 95	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5	162.5	
Method of analysis	- Settlement curve proposed by using the 1-dimensional consolidation theory(Terzaghi's theory). - The final settlement : 162.12cm. - Calculation of a final settlement according to degree of consolidation(50, 60, 70, 80, 90, 95%).								

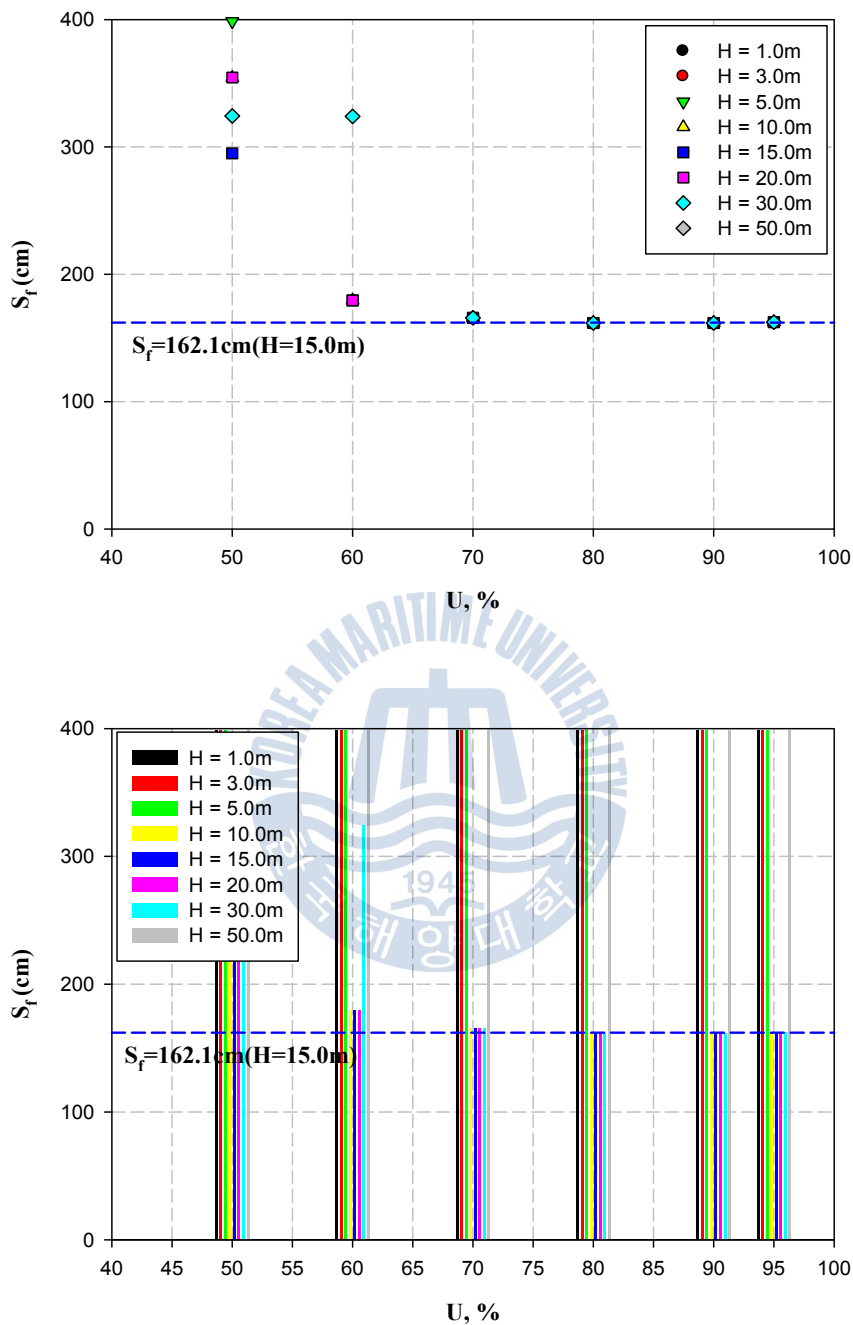


Fig. 5.4 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the depth of settlement layer(H) using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory

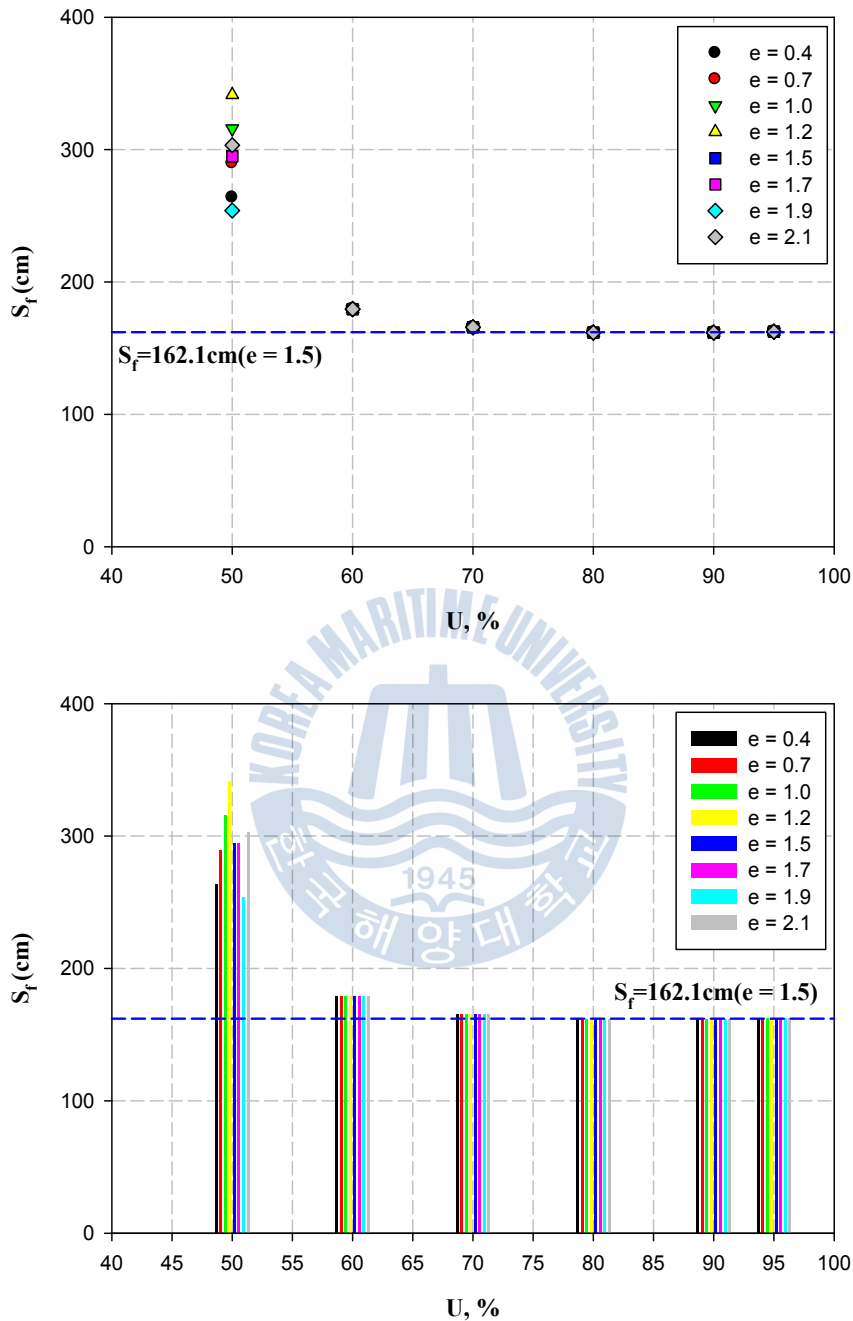


Fig. 5.5 Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the initial void ratio(e_0) using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory

5.1.2 예측기법에 의한 최종침하량 산정 결과 및 분석

Terzaghi 일차원압밀이론(1-D consolidation)에 의해 제시된 시간-침하량 곡선에 대하여 새로 제안된 예측기법을 포함한 각종 예측기법들을 통해 평균압밀도 변화에 따른 침하량 예측 결과는 Table 5.7과 Fig. 5.6과 같다. 산정된 예측 침하량들을 분석해 보면 다음과 같은 경향을 보인다.

Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 초기에는 Terzaghi's theory 침하량보다 작은 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 90%가 되었을 때 Terzaghi's theory 침하량보다 큰 값을 예측하였다. Hoshino법에 의한 침하량 예측 방법은 전체적으로 Terzaghi's theory 침하량보다 매우 큰 값을 예측하였으며, 평균압밀도 \bar{U} 가 증가할수록 이론 침하량 값에 근접하게 값을 예측하였다. \sqrt{S} 법에 의한 침하량 예측 방법은 전체적으로 Terzaghi's theory 침하량보다 작은 값을 예측하였으며, 평균압밀도 \bar{U} 가 증가할수록 이론 침하량 값에 근접하게 값을 예측하였다.

Monden법, Log S법, Kang's법에 침하량 예측 방법은 전체적으로 Terzaghi's theory 침하량보다 작은 값을 예측하였으며, \bar{U} 가 증가할수록 이론 침하량 값과 근접하게 값을 예측하였다. 예측 침하량 값은 대체적으로 Log S법 > Monden법 > Kang's법 경향을 보였다. 여기에서 Log S법이 가장 이론침하량에 근접함을 알 수 있었다. Kang's법에 의한 예측 침하량은 Hyperbolic법에 비해 평균 0.82배 작은 값을 예측하였다.

2nd-Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 Hyperbolic법과 같이 초기에는 Terzaghi's theory 침하량보다 작은 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 70%가 되었을 때 Terzaghi's theory 침하량보다 큰 값을 예측하였다. 2nd-Hyperbolic법에 의한 예측 침하량은 Hyperbolic법에 비해 평균 1.25배 큰 값을 예측하였다. 참고로 Hoshino법에 의해 예측된 예측 침하량이 Hyperbolic법에 비해 3.48배 이상의 큰 값을 보였다.

1-D Theory Simulation법에 의한 침하량 예측 방법은 초기에는 Terzaghi's theory 침하량보다 큰 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 70% 이후부터는 Terzaghi's theory 침하량에 거의 근접한 값들을 예측하였다. Terzaghi's theory

침하량과 거의 같은 식을 이용하므로 예측 침하량 값도 가장 신뢰성 있게 평가 되어졌다. 각 평균압밀도 별 각각의 예측법에 따른 침하량 예측 결과는 부록 A 에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.

Figs. 5.7~5.10는 Hoshino법, Kang's법, 2nd-Hyperbolic법, 1-D Theory Simulation법으로 구한 최종예측침하량과 Hyperbolic법으로 구한 최종예측침하량의 비를 나타낸 결과이다. Fig. 5.7는 Hoshino법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. Hoshino법에 의한 예측침하량은 Hyperbolic법의 예측침하량보다 3.48배 큰 값을 예측하였다. Fig. 5.8는 Kang's법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. Kang's법에 의한 예측침하량은 Hyperbolic법의 예측 침하량보다 0.82배 작았지만, 경향성은 다른 방법들에 비해 가장 잘 일치하였다. Fig. 5.9는 2nd-Hyperbolic법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. 2nd-Hyperbolic법은 전체적으로 Hyperbolic법보다 1.25배 큰 값을 예측하였다. Fig. 5.10는 1-D Theory Simulation법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. 1-D Theory Simulation법은 Hyperbolic법보다 1.45배 큰 값을 예측하였다.

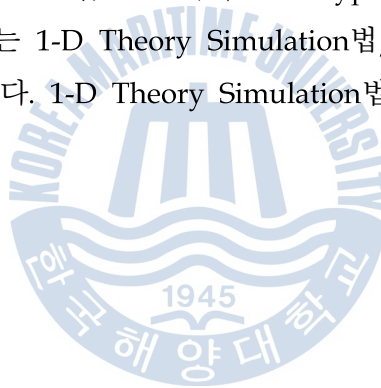


Table 5.7 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory

Used data for analysis (U, %)	Settlement prediction(cm)								Remark
	Hyperbolic Method	Hoshino Method	√S Method	Monden Method	Log S Method	Kang's Method	2 nd -Hyperbolic Method	1-D T.S. Method	
~ 50	98.8	-	85.4	86.8	86.3	74.9	98.8	295.0	- indicates unpredictable.
~ 60	117.6	914.1	100.7	107.0	101.4	90.3	136.9	179.4	
~ 70	134.3	542.7	115.0	121.8	115.5	104.3	134.4	165.8	
~ 80	152.1	375.3	131.4	136.6	131.5	119.8	243.8	161.8	
~ 90	169.4	287.2	150.6	148.8	150.4	136.3	264.6	161.7	
~ 95	176.5	250.8	160.9	154.2	160.4	145.1	202.3	162.5	
Method of analysis	- Settlement curve proposed by using the 1-dimensional consolidation theory(Terzaghi's theory). - The final settlement : 162.12cm. - Calculation of a final settlement using various settlement prediction techniques according to degree of consolidation(50, 60, 70, 80, 90, 95%).								

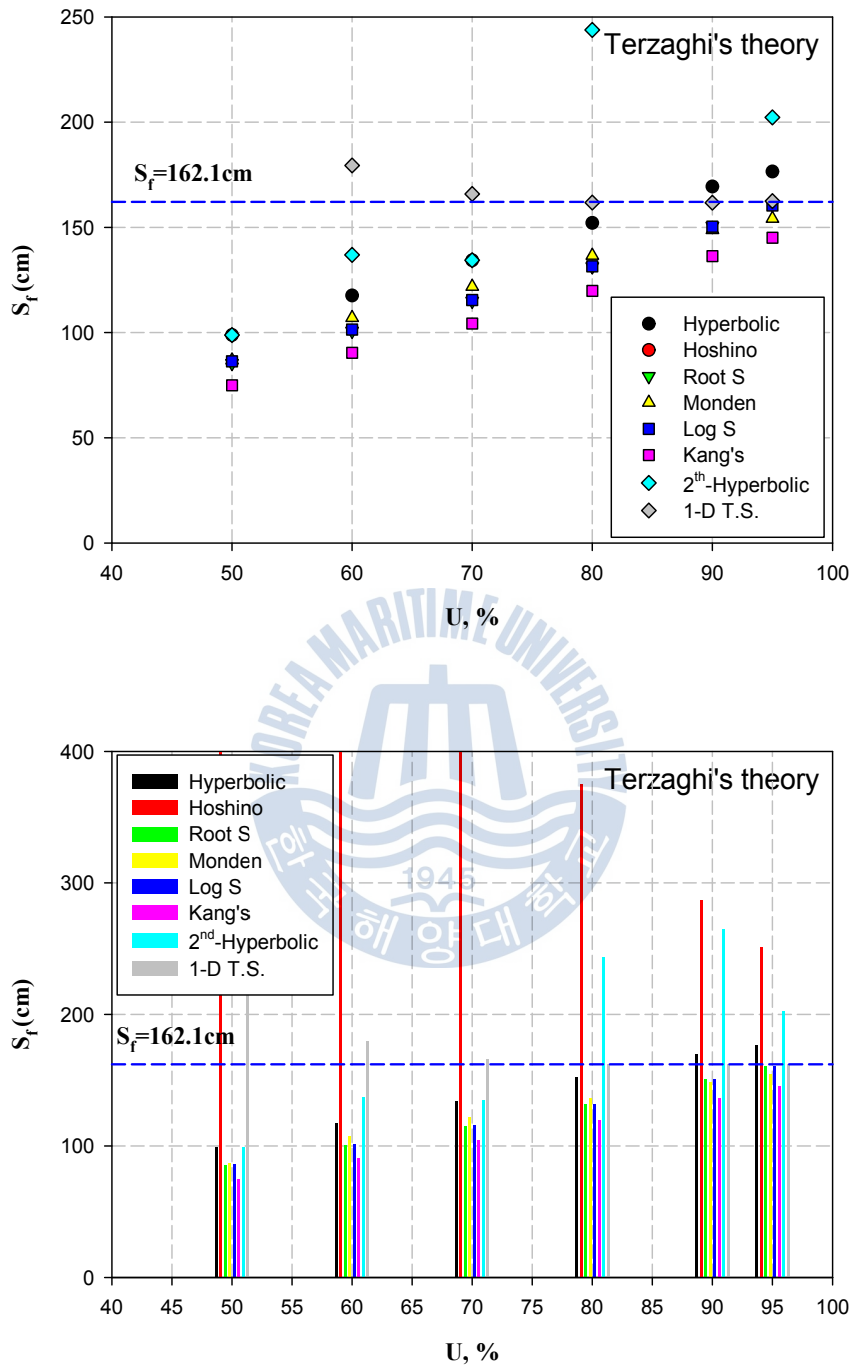


Fig. 5.6 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve estimated by Terzaghi's theory

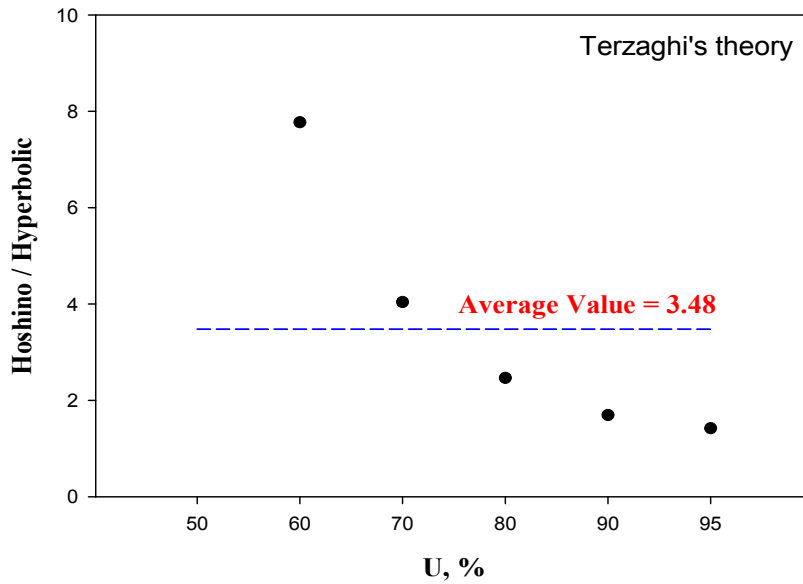


Fig. 5.7 Comparison of the final settlements between Hoshino method and Hyperbolic methods using the settlement curve estimated by Terzaghi's theory

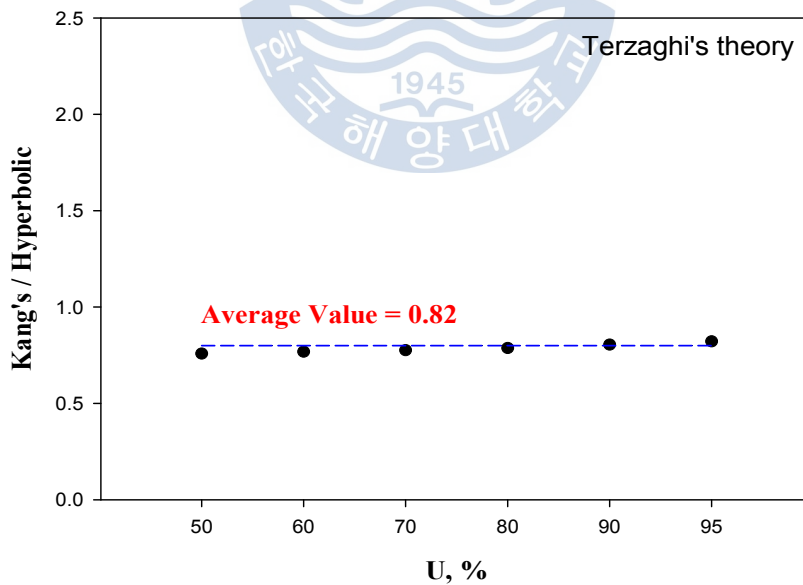


Fig. 5.8 Comparison of the final settlements between Kang's method and Hyperbolic methods using the settlement curve estimated by Terzaghi's theory

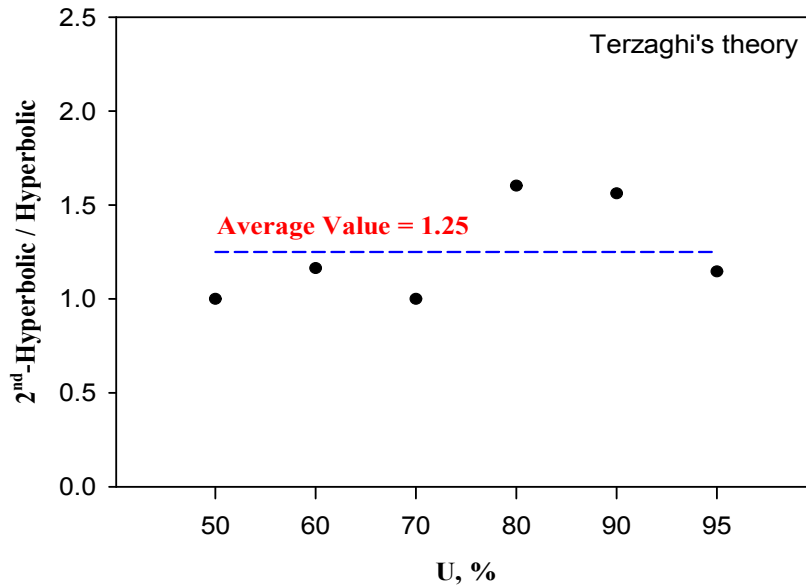


Fig. 5.9 Comparison of the final settlements between 2nd-Hyperbolic method and Hyperbolic methods using the settlement curve estimated by Terzaghi's theory

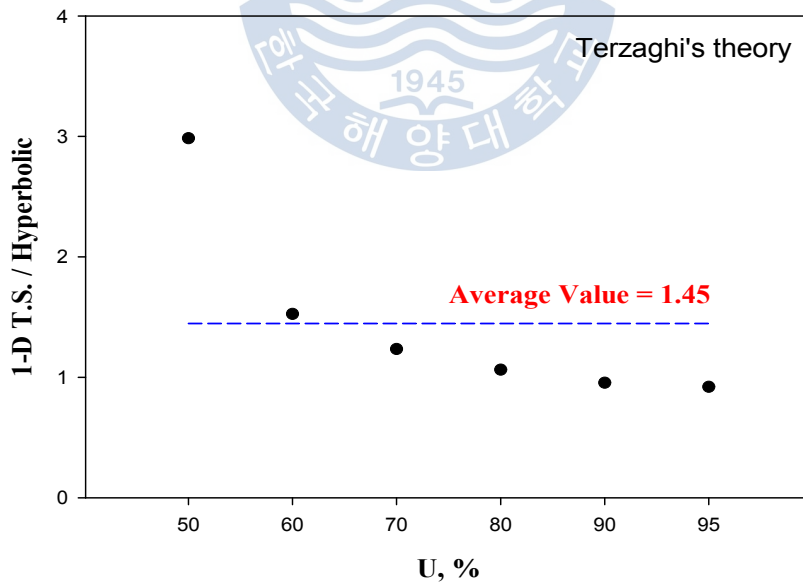


Fig. 5.10 Comparison of the final settlements between 1-D Theory Simulation method and Hyperbolic methods using the settlement curve estimated by Terzaghi's theory

5.2 수평배수이론 침하량을 이용한 예측

5.2.1 침하곡선 산정 조건

수평배수이론에 의한 Fig. 5.11과 같은 시간-침하량 곡선을 산정하였다. 산정에 사용된 값은 Table 5.8과 같다.

Table 5.8 Values used for construction of the time-settlement curve by the horizontal drainage theory

Classification	Input value	Unit
Space of drain, S	2.0	m
Diameter of influence circle, d_e	2.256	m
Conversion diameter of drain, d_w	0.05	m
Installation length of drain, L	15.0	m
Permeability coefficient of drain well, k_w	0.1000	cm/sec
Drainage capacity of drain well, q_w	1.9630	cm ³ /sec
Diameter of casing, d_m	0.115	m
Ratio of disturbance area, S	2	-
Diameter of smear zone, d_s	0.230	m
Permeability coefficient in-site/ Permeability coefficient of smear zone k_h/k_s	2	-
Influence factors, $F=F_n+F_s+F_w$	5.31	-

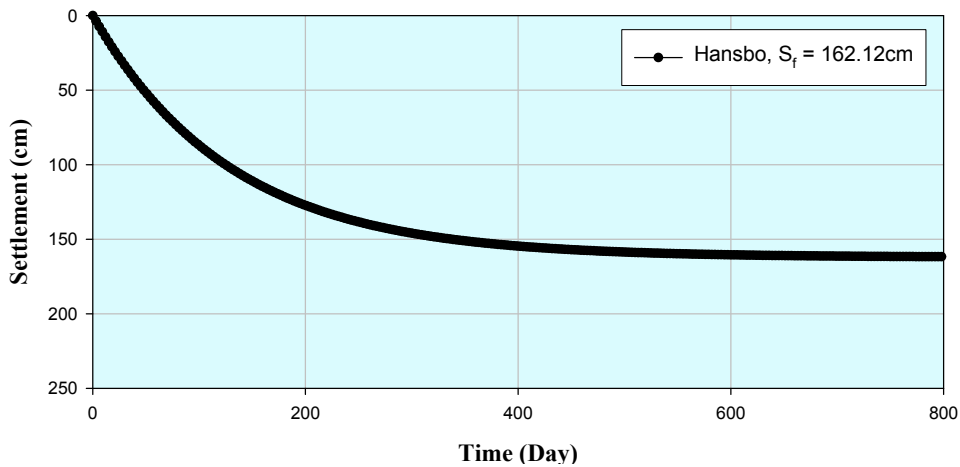


Fig. 5.11 Time - settlement curve proposed by the horizontal drainage theory

5.2.2 예측기법에 의한 최종침하량 산정 결과 및 분석

수평배수이론에 의한 시간-침하량 곡선에 대하여 평균압밀도 변화에 따른 각종 예측기법을 통해 산정된 예측 침하량을 산정한 결과는 Table 5.9와 Fig. 5.12와 같다. 산정된 예측 침하량들을 분석해 보면 다음과 같은 경향을 보인다.

Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 전체적으로 수평배수이론 침하량보다 큰 값을 예측하였으며, 평균압밀도 \bar{U} 가 증가할수록 이론 침하량 값과 근접하게 값을 예측하였다. Hoshino법에 의한 침하량 예측 방법은 전체적으로 수평배수이론 침하량보다 매우 큰 값을 예측하여 예측이 불가능한 것으로 판단되어졌다. \sqrt{S} 법에 의한 침하량 예측 방법은 전체적으로 수평배수이론 침하량보다 초기에는 작은 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 70%가 되었을 때 이론침하량보다 큰 값을 예측하였다.

Monden법, Kang's법에 의한 예측 방법은 초기부터 수평배수이론 침하량을 정확하게 예측함을 알 수 있었다. Log S법에 의한 예측 침하량은 \sqrt{S} 법 예측 침하량과 거의 동일한 경향으로 초기에는 작은 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 70%가 되었을 때 이론침하량보다 큰 값을 예측하였다.

2nd-Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 Hyperbolic법과 전반에 걸쳐 거

의 동일한 값과 경향을 보였다. 1-D Theory Simulation법에 의한 침하량 예측은 전체적으로 수평배수이론 침하량보다 매우 큰 값을 예측하였으며, 압밀도에 따라 최종 예측값이 일정한 경향성을 보이지 않고 불규칙하게 예측되었다. 이는 배수재 설치에 따른 배수거리를 고려하지 않은 영향이라 판단되어진다. 더 신뢰성 있는 최종침하량 예측을 위해서는 배수재 타설에 따른 배수거리에 대한 보정이 필요할 것으로 보인다. 각 평균압밀도 별 각각의 예측법에 따른 침하량 예측 결과는 부록 E에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.

Figs. 5.13~5.15는 Kang's법, 2nd-Hyperbolic법, 1-D Theory Simulation법으로 구한 최종 예측 침하량을 Hyperbolic법으로 구한 최종 예측 침하량의 비를 나타낸 결과이다. Fig. 5.13는 Kang's법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. Kang's법에 의한 예측침하량은 Hyperbolic법의 예측 침하량보다 0.63배 작았지만, 경향성은 다른 방법들에 비해 가장 잘 일치하였다. Fig. 5.14는 2nd-Hyperbolic법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. 2nd-Hyperbolic법은 Hyperbolic법과 대부분 동일한 값을 예측하였다. 앞의 1-D 압밀이론 침하량에 의한 결과와는 상이하게 2nd-Hyperbolic법에 의한 예측값이 Hyperbolic법과 거의 정확하게 일치함을 알 수 있다. Fig. 5.15는 1-D Theory Simulation법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. 1-D Theory Simulation법은 Hyperbolic법보다 1.35배 큰 값을 예측하였다.

Table 5.9 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory

Used data for analysis (U, %)	Settlement prediction(cm)								Remark
	Hyperbolic Method	Hoshino Method	√S Method	Monden Method	Log S Method	Kang's Method	2 nd -Hyperbolic Method	1-D T.S. Method	
~ 50	284.4	-	139.3	162.1	140.7	162.1	284.3	352.5	- indicates unpredictable.
~ 60	274.2	-	157.6	162.1	156.8	162.1	274.2	370.8	
~ 70	263.5	-	173.4	162.1	171.1	162.1	263.6	383.0	
~ 80	252.9	-	182.8	162.1	179.9	162.1	252.9	397.8	
~ 90	239.3	-	189.7	162.1	186.7	162.1	239.3	413.4	
~ 95	227.1	-	191.4	162.1	188.7	162.1	227.1	364.7	
Method of analysis	- Settlement curve proposed by using the horizontal drainage theory. - The final settlement : 162.12cm. - Calculation of a final settlement using various settlement prediction techniques according to degree of consolidation(50, 60, 70, 80, 90, 95%).								

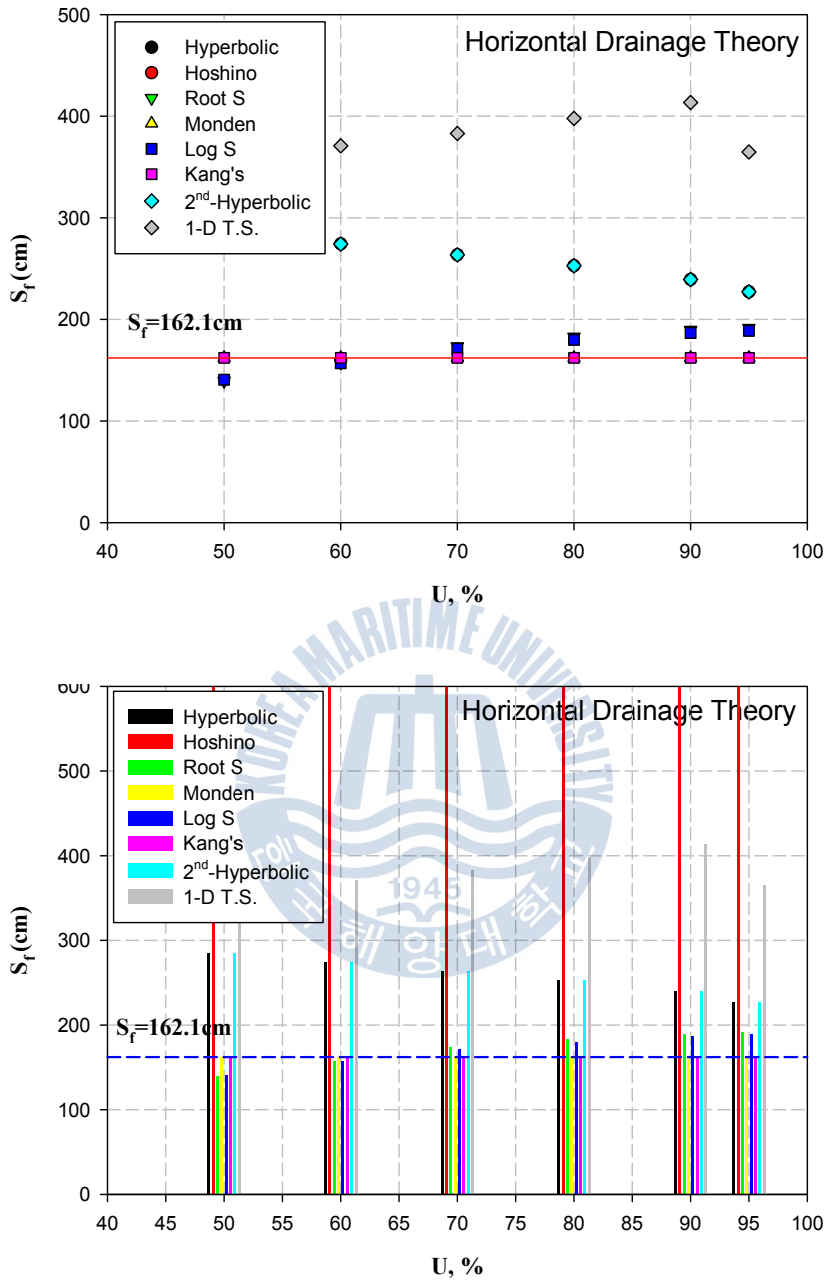


Fig. 5.12 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory

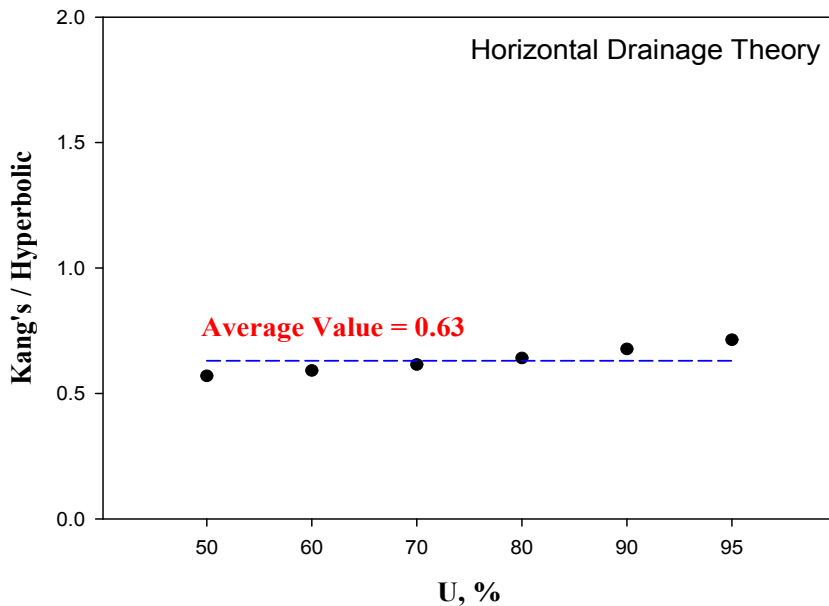


Fig. 5.13 Comparison of the final settlements between Kang's method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory

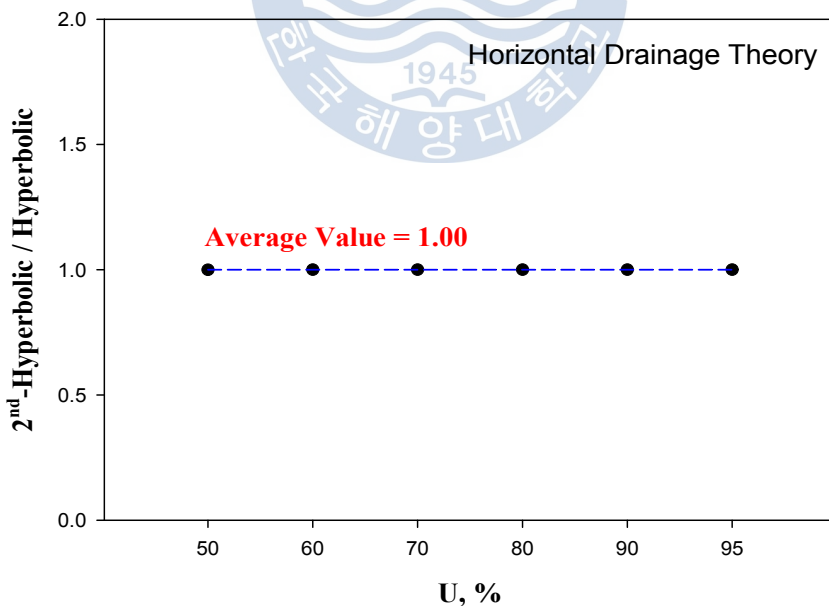


Fig. 5.14 Comparison of the final settlements between 2nd-Hyperbolic method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory

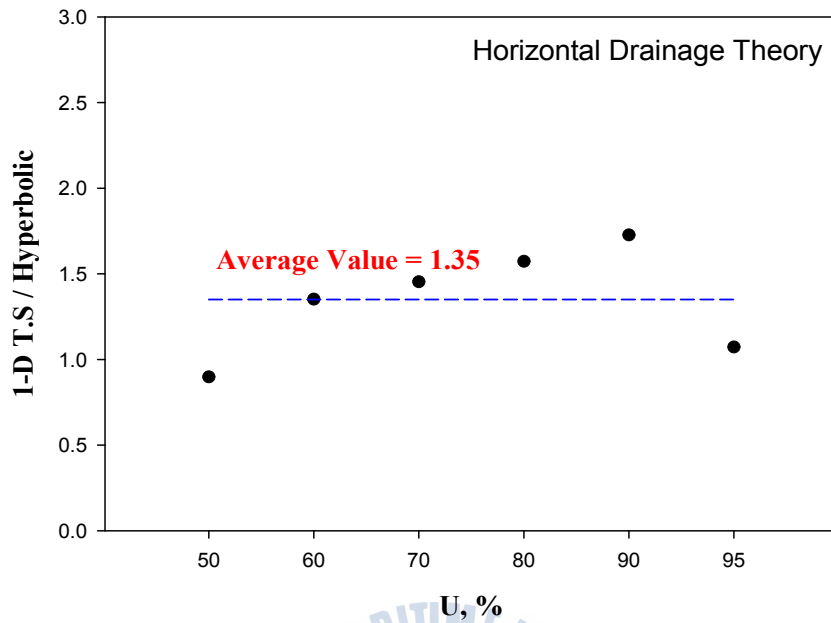


Fig. 5.15 Comparison of the final settlements between 1-D Theory Simulation method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory

5.3 유한요소해석 침하량에 대한 예측 침하량

5.3.1 침하곡선 산정 조건

유한요소해석에 의한 시간-침하량 곡선 산정에서는 앞의 Terzaghi이론과 수평배수이론과 다르게 대변형 침하형태를 고려하였다. 그래서 산정된 침하량은 671.3 cm 이다.

산정에 사용된 값들은 Table 5.10과 같다. Material Model은 Soft Soil Model 을 이용하였으며, 점토층의 Material Type을 Undrained 조건으로 해석하였다.

Table 5.10 Values used for construction of the time-settlement curve proposed by the finite element method

Classification	Input value	Unit	Remark
Soft Soil Model Constant, λ^*	0.32	-	$\frac{C_c}{2.302(1+e_0)}$
Soft Soil Model Constant, κ^*	0.032	-	$\frac{C_s}{2.302(1+e_0)}$
Thickness of clay-layer, H	15	m	
Saturated unit weight, γ_{sat}	17.0	kN/m ³	
Cohesion, C	1.0	kN/m ²	
Angle of internal friction, Φ	24.0	°	
Vertical permeability coefficient, K_v	$2.59E^{-4}$	m/day	
Horizontal permeability coefficient, K_h	$2.59E^{-3}$	m/day	
Consolidated settlement, S_f	671.3	cm	

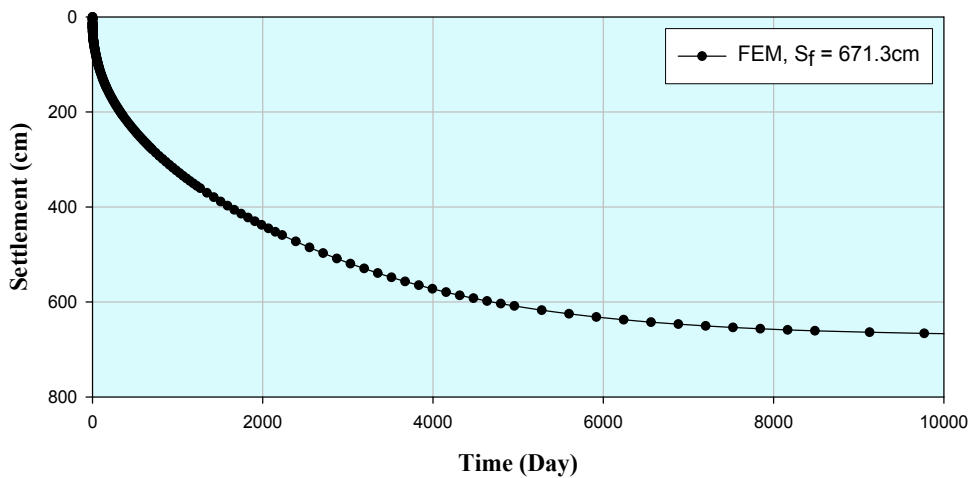


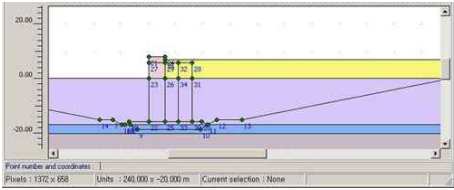

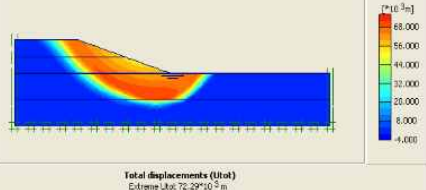
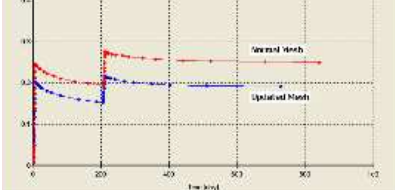
Fig. 5.16 Time - settlement curve proposed by the finite element method

본 해석에 이용된 PLAXIS는 네덜란드 PLAXIS사에서 개발한 2차원 지반공학 전용 상용 유한요소해석 프로그램이다. 프로그램은 연약지반의 압밀거동 뿐만 아니라 과압밀 점토 그리고 사질토 및 암반지반에도 적용이 가능한 다양한 재료모형을 갖고 있다. 연약지반에 강하다는 점은 매우 작은 전단강도의 지반에 굴착 또는 성토하는 경우에 지반의 붕괴를 포함한 변형해석이 가능할 뿐만 아니라 압밀침하 및 점성침하 등의 복잡한 지반변형을 계산할 수 있다.

복잡한 비선형 거동을 구하기 위하여 프로그램에는 다양한 구성(재료) 모형과 탄소성 상태에서 평형상태에 도달하기 위한 즉, 수렴(convergence)을 돕는 강력한 알고리즘을 보유하고 있으며, 요소망 자동생성 등 매우 쉬워 보이는 사용자 인터페이스와 복잡한 연약지반 거동분석 문제를 간단하게 해결하는 해석기능, 그리고 강도감소법 등 실무에 꼭 필요한 기능을 포함하고 있는 것이 프로그램의 특징이다. 절리성 암반을 포함한 사용자 정의 재료모형(user defined material model)의 적용이 가능하며, 시공단계에 따른 침투해석과 그에 따른 유효응력해석 기능도 추가되었다. 터널 단면을 쉽게 생성할 수 있는 tunnel designer기능과 하중분배율 기능으로 쉘드터널은 물론 NATM터널의 해석이 가능하다. 프로그램은 Table 5.11과 같이 독립적인 4개의 프로그램으로 구성되어있다. Figs. 5.17과 5.18은 각각 수행된 프로그램의 메쉬 변형과 변형 콘타 및 시

간-침하량 그래프를 보여주고 있다.

Table 5.11 Composition of PLAXIS program

Input Program	Calculations Program
	
Output Program	Curve Program
	

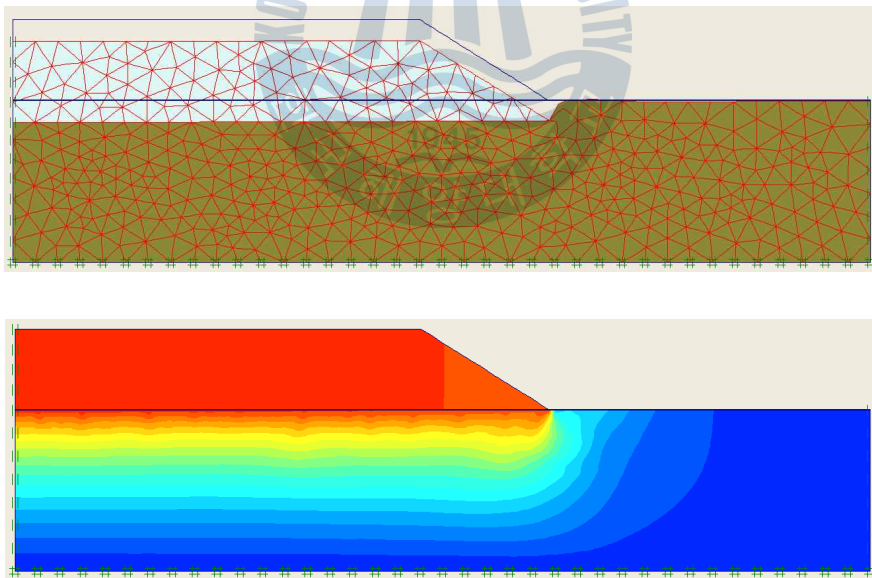


Fig. 5.17 A example of deformed mesh and contour after analysis

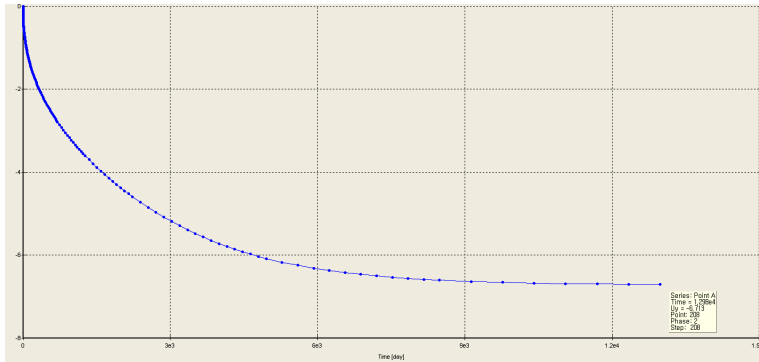


Fig. 5.18 A example of calculated time-settlement curve after analysis

5.3.2 예측기법에 의한 최종침하량 산정 결과 및 분석

유한요소해석에 의한 시간-침하량 곡선에 대하여 평균압밀도 변화에 따른 각종 예측기법을 통해 산정된 예측 침하량을 산정한 결과는 Table 5.12과 Fig. 5.19과 같다. 산정된 예측 침하량들을 분석해 보면 다음과 같은 경향을 보인다.

Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 전체적으로 유한요소 해석 침하량 보다 작은 값을 예측하였으며, 평균압밀도 \bar{U} 가 증가할수록 해석 침하량 값과 근접하게 값을 예측하였다. Hoshino법에 의한 침하량 예측 방법은 전체적으로 유한요소 해석 침하량보다 매우 큰 값을 예측하였으며, 평균압밀도 \bar{U} 가 증가할수록 해석 침하량 값과 더 큰 차이를 보이는 값을 예측하였다.

\sqrt{S} 법, Monden법, Log S법, Kang's법에 의한 침하량 예측 방법은 Hyperbolic법에 의한 예측 침하량 보다 작은 값들로 비슷한 경향성을 띄며, 전체적으로 유한요소 해석 침하량보다 작은 값을 예측하였으며, 평균압밀도 \bar{U} 가 증가할수록 해석 침하량 값과 근접하게 값을 예측하였다. 예측 침하량 값은 대체적으로 Monden법 > \sqrt{S} 법 > Log S법 > Kang's법 경향을 보였다.

2nd-Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 Hyperbolic법과 같이 초기에는 유한요소 해석 침하량보다 작은 값을 예측하다가 평균압밀도, \bar{U} 가 70% 되었을 때 유한요소 해석 침하량보다 큰 값을 예측하였다. 1-D Theory Simulation 법에 의한 침하량 예측법은 전체적으로 유한요소 해석 침하량보다 작은 값을 예측하였으며, 평균압밀도 \bar{U} 가 증가할수록 해석 침하량 값과 근접하게 값을

예측하였다. 각 평균압밀도 별 각각의 예측법에 따른 침하량 예측 결과는 부록 F에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.

Figs. 5.20~5.23는 Hoshino법, Kang's법, 2nd-Hyperbolic법, 1-D Theory Simulation법으로 구한 최종 예측 침하량을 Hyperbolic법으로 구한 최종 예측 침하량의 비를 나타낸 결과이다. Fig. 5.20는 Hoshino법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. Hoshino법에 의한 예측침하량은 Hyperbolic법의 예측 침하량보다 1.57배 큰 값을 예측하며 일정한 경향성을 보였다. Fig. 5.21는 Kang's법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. Kang's법에 의한 예측침하량은 Hyperbolic법의 예측 침하량보다 0.81배 작았지만, 경향성은 다른 방법들에 비해 가장 잘 일치하였다. Fig. 5.22는 2nd-Hyperbolic법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. 2nd-Hyperbolic법은 전체 적으로 Hyperbolic법보다 뚜렷한 경향을 보이지 않았으며 큰 값을 예측하여 1.23배 큰 값을 예측하였다. Fig. 5.23은 1-D Theory Simulation법/Hyperbolic법의 최종침하량 비교를 도시한 결과이다. 1-D Theory Simulation법은 Hyperbolic법보다 큰 값을 예측하여 0.98배 큰 값을 예측하였다. 여기서는 1-D Theory Simulation법이 Hyperbolic법과 가장 일정한 상관성을 보임을 알 수 있다.

Fig. 5.24에서는 상기 Terzaghi 압밀이론식에 의한 침하량 또는 수평배수이론에 의한 침하량에 대한 해석시에는 나타나지 않았던 경향을 확인할 수 있었다. Hyperbolic법에 의해 예측된 곡선이 유한요소 해석에 의해 얻어진 시간-침하량 곡선과 상이한 결과를 나타내었지만, Hoshino법과 함께 2nd-Hyperbolic법에 의해 예측된 곡선은 유한요소 해석으로 얻어진 시간-침하량 곡선에 가장 근접함을 알 수 있다. 또한 과대하게 최종침하량을 예측하거나, 빈번하게 최종침하량을 예측하지 못하는 Hoshino법에 비해 2nd-Hyperbolic법에 의한 최종침하량 예측값은 현실적일 뿐 아니라, 상대적으로 안정적임을 알 수 있다.

Table 5.12 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the finite element method

Used data for analysis (U, %)	Settlement prediction(cm)								Remark
	Hyperbolic Method	Hoshino Method	√S Method	Monden Method	Log S Method	Kang ' s Method	2 nd -Hyperbolic Method	1-D T.S. Method	
~ 50	386.1	629.2	347.1	335.9	340.1	305.3	386.1	373.0	
~ 60	442.7	729.1	395.9	395.0	386.7	353.0	640.9	436.8	
~ 70	505.1	831.1	449.7	460.7	437.7	406.9	723.0	504.5	
~ 80	562.4	909.8	499.1	521.7	485.0	457.2	562.5	567.1	
~ 90	645.2	958.1	577.6	596.5	561.0	533.9	813.6	630.8	
~ 95	669.8	946.3	603.9	617.3	587.5	559.3	818.6	646.7	
Method of analysis	- Settlement curve proposed by using the finite element method. - The final settlement : 671.3cm. - Calculation of a final settlement using various prediction techniques according to degree of consolidation (50, 60, 70, 80, 90, 95%).								

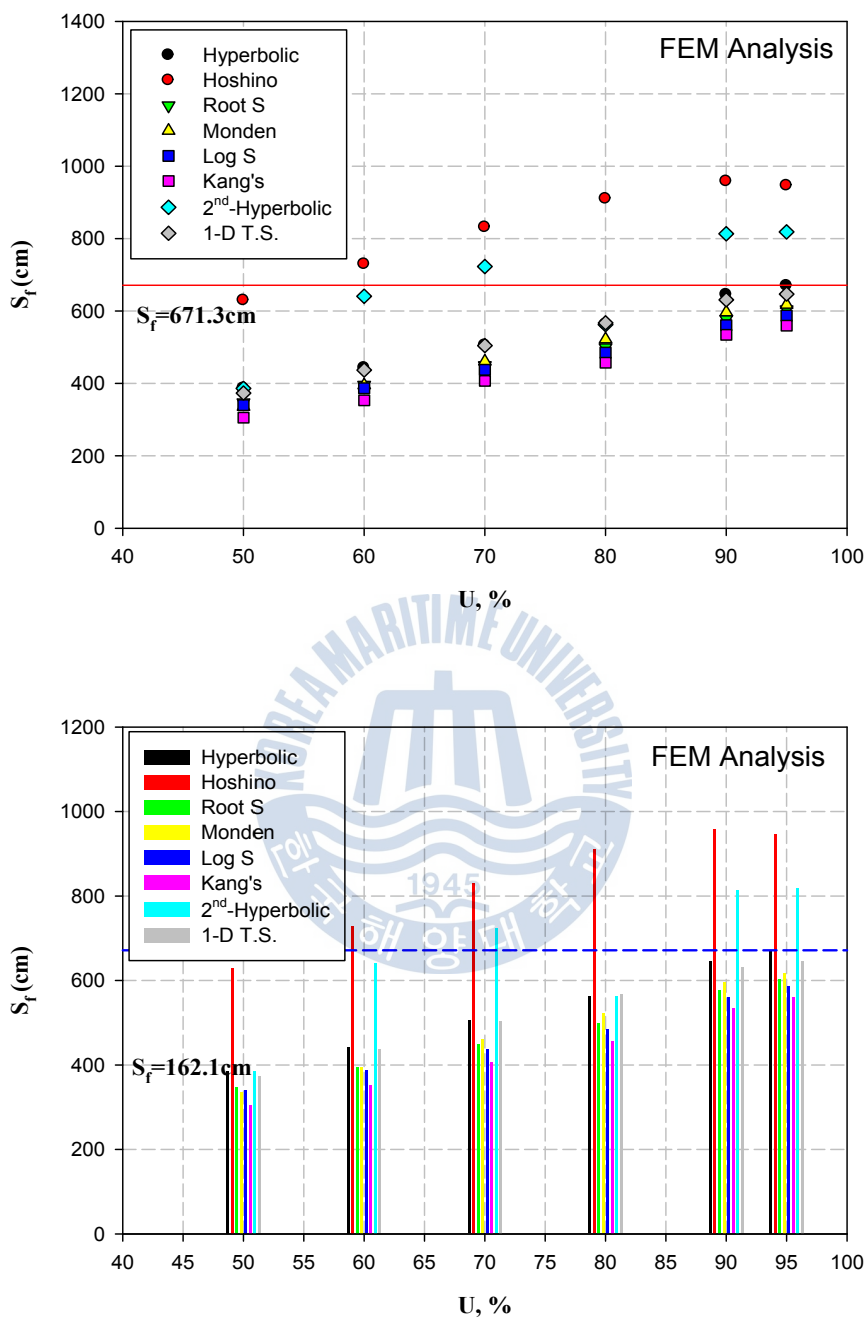


Fig. 5.19 Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the finite element method

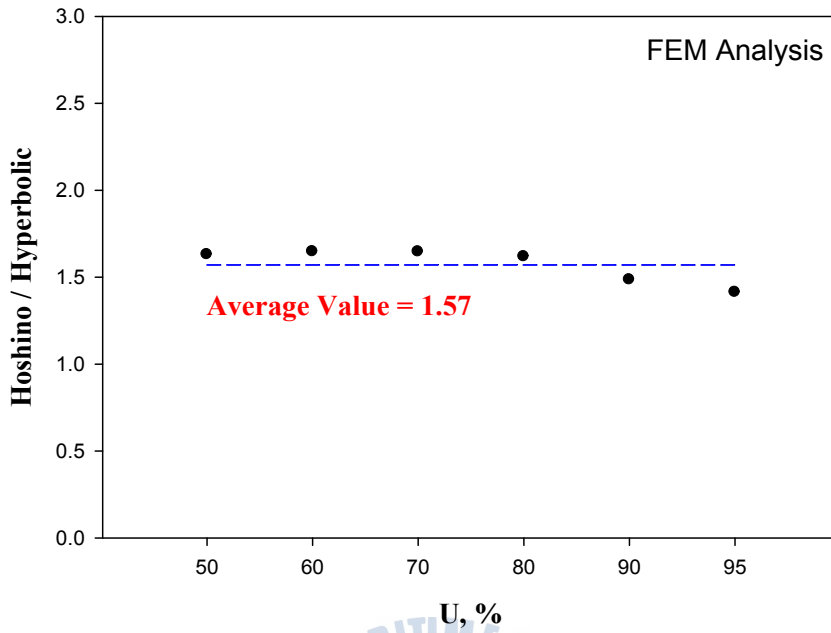


Fig. 5.20 Comparison of the final settlements between Hoshino method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method

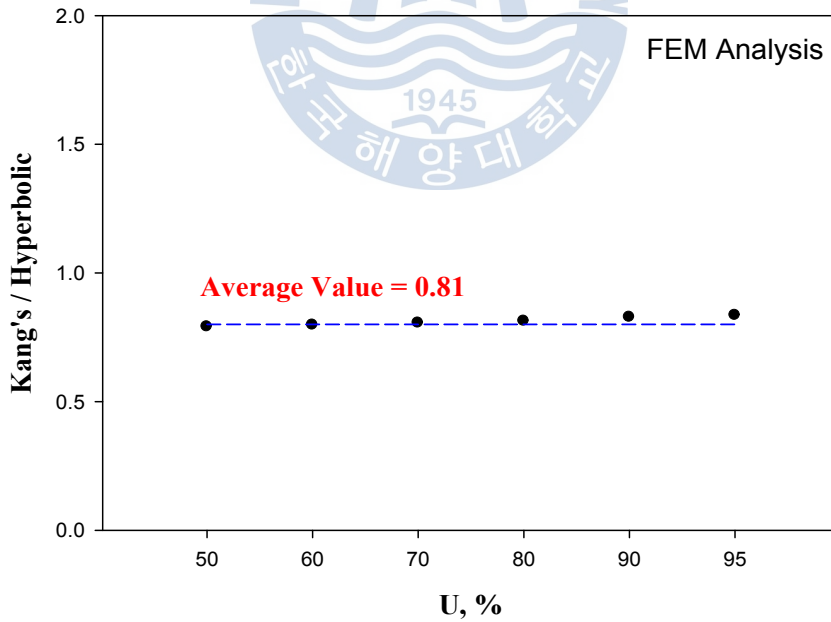


Fig. 5.21 Comparison of the final settlements between Kang's method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method

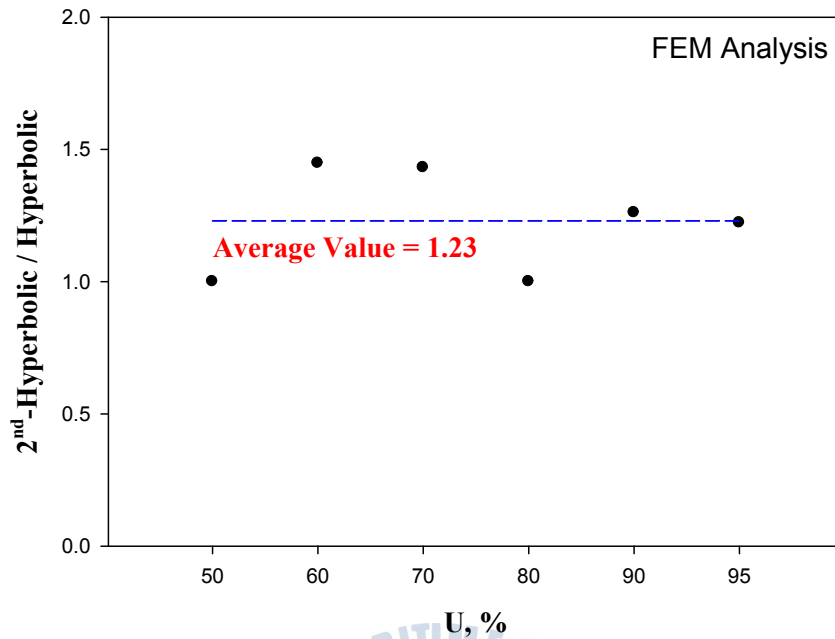


Fig. 5.22 Comparison of the final settlements between 2nd-Hyperbolic method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method

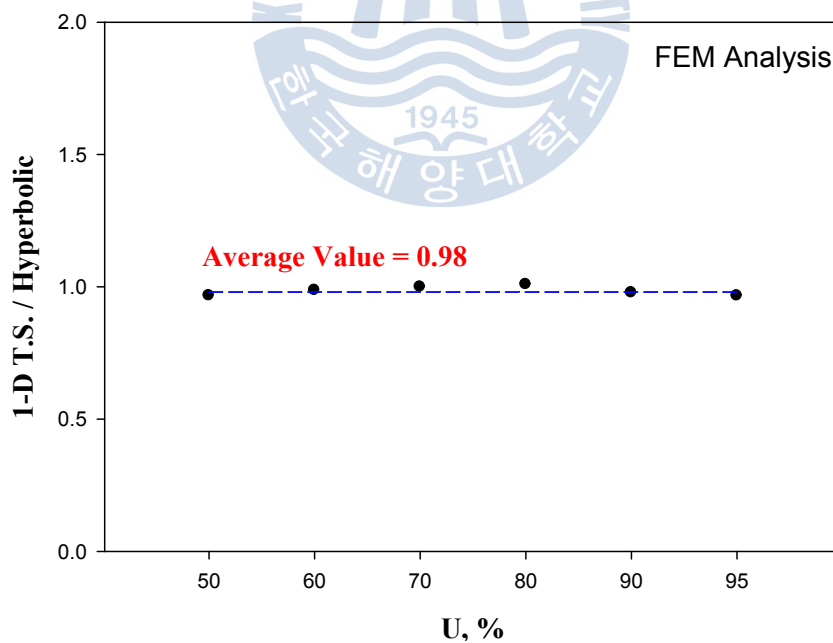
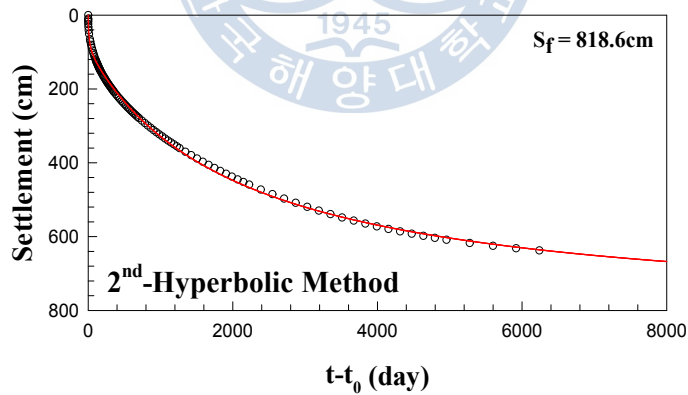
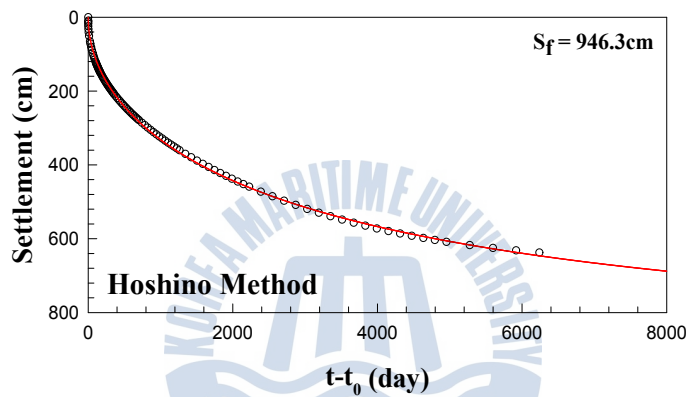
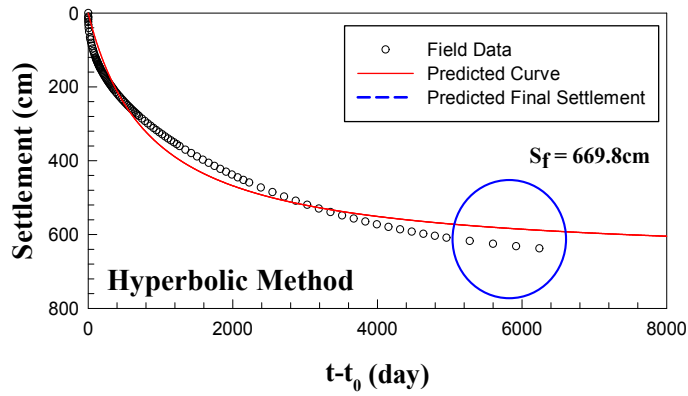


Fig. 5.23 Comparison of the final settlements between 1-D Theory Simulation method and Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method



F.E.M Analysis ($U < 95\%$)

Fig. 5.24 Comparison of the final settlements between Hyperbolic method, Hoshino method, and 2nd-Hyperbolic method using the settlement curve proposed by the finite element method

5.4 요약

본 장에서는 제 4 장에서 새롭게 제시된 방법의 선행 검증 단계로 1차원 압밀이론(Terzaghi's theory), 수평배수이론 및 유한요소해석 프로그램을 이용하여 산정된 시간-침하 곡선을 이용하여 기존 및 새로 제시된 예측기법으로 최종침하량을 산정하여 그 결과 분석을 통해 새로 제안된 침하량 예측기법들의 경향성 및 장·단점을 분석하였다.

1차원 압밀이론의 시간-침하량 곡선을 이용하여 수행된 기존의 침하예측기법들의 경향은 다음과 같다. Hyperbolic법과 Hoshino법을 제외한 \sqrt{S} 법, Monden법, Log S법에 의해 예측된 최종침하량이 이론 침하량 보다 적게 예측되었다. Hoshino법은 이론 침하량보다 매우 크게 최종침하량을 예측하는 것으로 나타났다. Kang's법에 의한 예측 침하량은 전체적으로 Terzaghi's theory 침하량보다 작은 값을 예측하였으며, \bar{U} 가 증가할수록 이론 침하량 값과 근접하게 값을 예측하였다. 2nd-Hyperbolic법에 의한 침하량은 초기에는 Terzaghi's theory 침하량보다 작은 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 70% 되었을 때 Terzaghi's theory 침하량보다 큰 값을 예측하였다. 1-D Theory Simulation법에 의한 침하량 예측 방법은 초기에는 Terzaghi's theory 침하량보다 큰 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 70% 이후부터는 Terzaghi's theory 침하량에 거의 근접한 값들을 예측하였다. Terzaghi's theory 침하량과 거의 같은 식을 이용하므로 예측 침하량 값도 가장 신뢰성 있게 평가 되어졌다.

수평배수이론에 의한 시간-침하량 곡선을 이용하여 수행된 침하량 예측기법들의 경향은 아래와 같다. Hyperbolic법은 수평배수이론 침하량보다 큰 값을 예측하였으며, 평균압밀도 \bar{U} 가 증가할수록 이론 침하량 값과 근접하게 값을 예측하는 것으로 나타났다. Hoshino법은 이론 침하량보다 매우 큰 값을 예측하여 예측이 불가능한 것으로 나타났다. \sqrt{S} 법은 이론 침하량보다 초기에는 작은 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 70% 되었을 때 이론침하량보다 큰 값을 예측하고, Monden법은 이론 침하량을 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 예측 침하량 값은 대체적으로 Hoshino법 > Hyperbolic법 > \sqrt{S} 법 > Log S법 > Monden법 순으로 나타났다. Kang's법에 의한 예측 방법은 초기부터 수평배수

이론 침하량을 정확하게 예측함을 알 수 있었다. 2nd-Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 Hyperbolic법과 전반에 걸쳐 거의 동일한 값과 경향을 보였다. 1-D Theory Simulation법에 의한 침하량 예측은 전체적으로 수평배수이론 침하량보다 매우 큰 값을 예측하였으며, 압밀도에 따라 최종 예측값이 일정한 경향성을 보이지 않고 불규칙하게 예측되었다. 이는 배수재 설치에 따른 배수거리를 고려하지 않은 영향이라 판단되어진다. 더 신뢰성 있는 최종침하량 예측을 위해서는 배수재 타설에 따른 배수거리에 대한 보정이 필요할 것으로 보인다.

유한요소해석에 의한 시간-침하량 곡선을 이용하여 수행된 침하량 예측기법들의 경향은 다음과 같다. Hoshino법을 제외하고 모든 예측법들이 유한요소해석 침하량보다 작은 값을 예측하였다. 예측 침하량 값은 대체적으로 Hoshino법 > Hyperbolic법 > Monden법 > \sqrt{S} 법 > Log S법 순으로 나타났다. Kang's법에 의한 예측침하량은 Hyperbolic법의 예측 침하량보다 0.81배 작았지만, 경향성은 다른 방법들에 비해 가장 잘 일치하였다. 2nd-Hyperbolic법은 전체적으로 Hyperbolic법보다 뚜렷한 경향을 보이지 않았으며 1.23배 큰 값을 예측하였다. 1-D Theory Simulation법은 Hyperbolic법보다 0.98배 큰 값을 예측하였다. 여기서는 1-D Theory Simulation법이 Hyperbolic법과 가장 일정한 상관성을 보임을 알 수 있다.

제 6 장 현장계측에 의한 침하량 예측 분석

본 장은 현장계측치를 이용하여 새로 제시된 침하 예측법들로 침하량을 예측하여 다른 기존 침하량 예측법처럼 사용이 가능한지를 상호 신뢰도 분석을 통해 검증하였다. 또한 제안된 Kang's법이 단계성토시 초기 성토 단계에서도 다음 단계침하량 뿐만 아니라 최종침하량 예측이 가능함을 분석하였다.

6.1 화전지구

6.1.1 최종침하량 산정 결과 및 분석

화전지구에서 계측된 시간-침하량 곡선에 대하여 평균압밀도 변화에 따른 각종 예측기법을 통해 산정된 예측 침하량을 산정한 결과는 Table 6.1과 Fig. 6.1과 같다. Fig. 6.1에서 알 수 있듯이 화전지구에서 산정된 예측침하량을 예측기법 별로 분석해 보면 Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 전체적으로 \sqrt{S} 법, Monden법, Log S법, Kang's법과 비슷한 값과 경향을 보여주고 있다.

Hoshino법에 의한 방법은 전체적으로 다른 예측기법에 비해 매우 큰 값을 예측하고 값의 분포도 매우 산만하여, 일반적인 해로 보기 힘든 경우가 많음을 알 수 있다. 그러므로 이후 본 논문에서 Hoshino법에 대한 분석은 언급하지 않고자 한다.

\sqrt{S} 법에 의한 방법은 Monden법, Log S법, Kang's법과 함께 Hyperbolic법과 비슷한 경향을 보이며 Hyperbolic법보다 대체로 작은 값을 예측하였다. 2nd-Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 Hyperbolic법과 대부분 동일한 값을 보이나, 일부 몇 지점에서 큰 값을 예측하는 경향을 보였다. 1-D Theory Simulation법에 의한 방법은 매우 큰 값을 예측하고 값의 분포도 매우 산만하여, 일반적인 해로 보기 힘든 경우가 많음을 알 수 있다. 이는 앞에서도 언급한

바와 같이 배수재 설치에 따른 배수거리의 변화와 평균압밀도 \bar{U} 를 전제로 하는 이론식으로는 한계가 있다고 판단된다. 화전지구 각 지역 별 각각의 예측법에 따른 침하량 예측 결과는 부록 G에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.

본 연구에서는 어느 정도 신뢰성을 인정받은 기존의 예측기법인 Hyperbolic 법, \sqrt{S} 법, Monden법, Log S법의 예측값들의 평균값을 산정하여 보편적 평균 예측 침하량이라 정의하였다. Hoshino법에 의한 예측값은 값들을 매우 크게 예측하여 일반적인 해로 보기 힘든 경우가 많아 그림에서 표현하기 어려운 값에 대해서는 “ \uparrow ”와 같이 표기하였으며, 보편적 평균 예측침하량 대상에서 제외시켰다.

Fig. 6.2는 예측기법 침하량/보편적 평균 예측침하량 비교를 도시한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 1-D Theory Simulation법, 2nd-Hyperbolic법, Hyperbolic법, Log S법, \sqrt{S} 법, Monden법, Kang's법 순으로 4.38, 1.55, 1.14, 0.98, 0.96, 0.92, 0.82의 비를 보였으며, Log S법이 보편적 평균 예측침하량과 가장 근사한 값을 예측하였다.

Figs. 6.3~6.6은 예측기법 침하량/Hyperbolic법 예측침하량 비교를 도시한 결과이다. Fig. 6.3에서 알 수 있듯이 1-D Theory Simulation법, 2nd-Hyperbolic법, Monden법, Log S법, \sqrt{S} 법, Kang's법 순으로 4.27, 1.67, 0.93, 0.87, 0.84, 0.72의 비를 보였으며, Monden법이 0.93배의 비로 쌍곡선 예측침하량과 가장 근사한 값을 예측하였다.

Fig. 6.4는 Kang's법/Hyperbolic법 예측침하량 비교를 도시한 결과이다. Fig. 6.3과 같이 참고해 볼 때, Kang's법에 의한 예측침하량은 Hyperbolic법의 예측침하량보다 0.72배 작았지만, 경향성은 다른 방법들에 비해 가장 잘 일치하였다.

Fig. 6.5는 2nd-Hyperbolic법/Hyperbolic법 예측침하량 비교를 도시한 결과이다. 2nd-Hyperbolic법은 Hyperbolic법과 대부분 동일한 값을 보이나, 일부 몇 지점에서 1.67배 큰 값을 예측하였다.

Fig. 6.6는 1-D Theory Simulation법/Hyperbolic법 예측침하량 비교를 도시한

결과이다. 1-D TheorySimulation 법은 Hyperbolic법에 비해 대부분 매우 큰 값을 예측하고, 경향성 또한 불규칙하였다.

예측된 침하량과 계측된 침하계측자료의 편차를 정의하는 Root Mean Square Error(RMSE)를 이용하여 신뢰도를 평가한 결과이다. RMSE는 다음 식 (6.1)로 정의된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (S_{pred.} - S_{meas.})^2}{N}} \quad (6.1)$$

여기서, $S_{pred.}$: 각종 예측기법에 의한 예측침하

$S_{meas.}$: 현장 계측침하

N : 계측 데이터 개수

Fig. 6.7의 화전지구의 RMSE 산정값을 결과에서 알 수 있듯이 RMSE 산정값이 1-D Theory Simulation법, Hoshino법, \sqrt{S} 법, Log S법, Kang's법 Hyperbolic법, 2nd-Hyperbolic법, Monden법 순으로 각각 4.22, 3.81, 1.35, 0.96, 0.78, 0.48, 0.38, 0.25의 값을 보여, RMSE 값으로만 판단할 경우 Monden법이 가장 신뢰도가 높은 것으로 평가되었다. Kang's법은 RMSE값이 Hyperbolic법, 2nd-Hyperbolic법 및 Moden법보다 크게 나타났다. 이것은 Kang's 법이 다른 방법에 비해 신뢰도가 낮다는 것을 의미하는 것은 아니다. 왜냐하면 Kang's법의 RMSE를 실제 침하량으로 환산하면 그 값은 매우 작은 값이기 때문이다. 여기서 Kang's법의 RMSE값은 다른 침하량 예측방법들과 같이 Kang's법의 신뢰성이 확보되어 있음을 보여 주는 것이 가장 큰 의미이다.

Fig. 6.8에서는 Hyperbolic법과 Kang's법의 상관관계 결정계수 R^2 가 0.958로 높은 상관관계를 보이고 있어 Kang's법의 신뢰성이 높음을 간접적으로 확인할 수 있다.

Table 6.1 Comparison of the final settlements predicted by each method(Hwajeon site)

Zone	Settlement prediction(cm)								Remark
	Hyperbolic Method	Hoshino Method	\sqrt{S} Method	Monden Method	Log S Method	Kang ' s Method	2 nd -Hyperbolic Method	1-D T.S. Method	
P-1	26.5	195.0	23.1	19.3	24.8	19.1	26.6	48.5	- indicates unpredictable.
P-2	21.5	-	18.5	15.2	20.3	15.3	21.5	43.4	
P-3	102.9	141.7	94.7	81.7	94.7	80.3	102.9	765.5	
P-4	95.1	140.2	87.2	72.5	87.4	72.3	95.1	78.5	
P-5	6.6	14.1	5.8	43.1	8.1	5.1	102.2	153.0	
P-10	111.3	-	91.8	74.5	92.4	75.5	111.2	286.9	
P-16	116.1	566.2	101.3	87.6	101.5	84.7	137.0	301.1	
P-17	121.3	235.4	108.4	94.7	108.3	90.9	121.3	315.4	
P-18	107.6	-	75.7	72.4	78.2	68.1	291.3	418.5	
P-19	109.5	204.2	98.1	82.4	98.2	81.7	109.5	309.3	
Note	- The soft ground of study site was improved almost every part of area by a vertical drain.								

Table 6.1 (Continued)

Zone	Settlement prediction(cm)								비 고
	Hyperbolic Method	Hoshino Method	\sqrt{S} Method	Monden Method	Log S Method	Kang ' s Method	2 nd -Hyperbolic Method	1-D T.S. Method	
P-23	125.7	-	79.9	87.5	83.2	77.2	-	437.7	- indicates unpredictable.
P-30	87.3	-	68.2	58.6	70.3	58.0	187.1	263.8	
P-40	208.2	463.8	184.5	164.7	182.5	155.1	208.2	676.2	
P-44	87.0	-	72.9	58.1	74.2	59.3	87.3	315.4	
P-46	147.5	615.4	129.1	117.6	128.6	109.4	147.5	589.7	
P-49	172.2	205.9	162.5	147.9	161.7	141.7	172.2	661.8	
P-50	72.9	-	58.5	50.8	60.5	49.4	72.9	390.9	
P-51	131.7	-	104.3	90.2	105.0	87.7	131.7	376.6	
P-52	156.3	247.4	141.7	122.8	140.9	119.0	156.3	565.2	
P-55	113.7	-	96.5	82.8	97.0	80.8	113.7	465.6	
Note	- The soft ground of study site was improved almost every part of area by a vertical drain.								

Table 6.1 (Continued)

Zone	Settlement prediction(cm)								비 고
	Hyperbolic Method	Hoshino Method	\sqrt{S} Method	Monden Method	Log S Method	Kang ' s Method	2 nd Hyperboic Method	1-D Method	
P-56	77.2	-	65.3	57.4	66.8	54.7	84.0	291.7	- indicates unpredictable.
P-57	118.5	209.0	106.1	98.4	106.3	91.5	240.7	575.5	
P-60	115.1	-	95.1	88.2	96.0	80.6	115.1	322.3	
P-61	124.0	-	87.1	73.4	89.2	77.3	124.0	268.8	
P-62	70.0	-	49.7	45.5	53.4	44.7	121.2	184.1	
P-63	104.3	-	82.8	76.2	84.3	70.4	106.8	317.7	
P-64	132.2	165.2	123.7	112.4	123.4	107.2	132.2	376.5	
SP-1	72.4	110.9	65.9	58.5	66.5	56.2	72.4	554.2	
SP-2	77.2	89.2	73.5	63.1	73.6	62.9	77.2	535.1	
SP-3	118.7	-	90.1	78.5	91.6	77.6	122.2	515.3	
Note	- The soft ground of study site was improved almost every part of area by a vertical drain.								

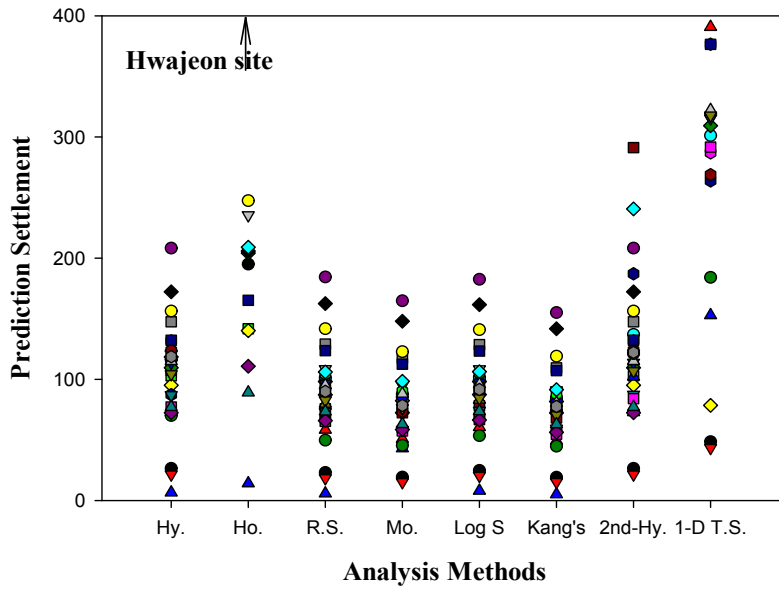


Fig. 6.1 Comparison of the final settlements predicted by each method(Hwajeon site)

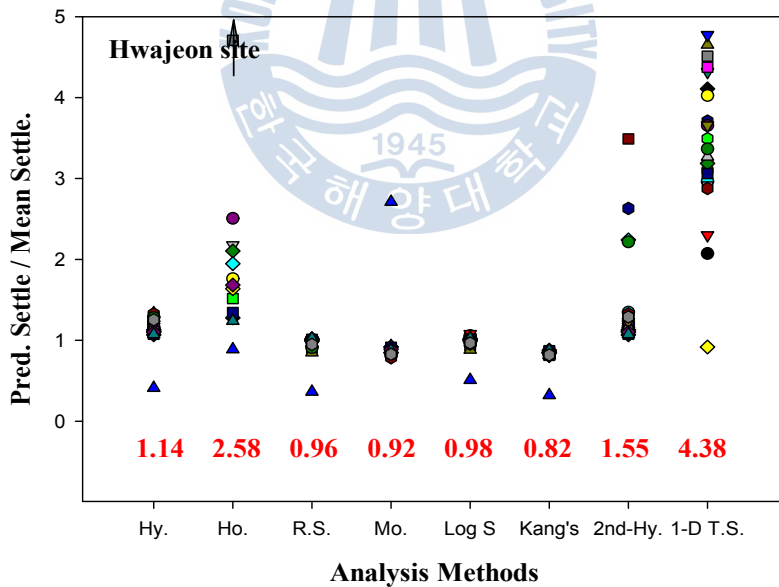


Fig. 6.2 Comparison of settlements between prediction/mean settlement and analysis methods(Hwajeon site)

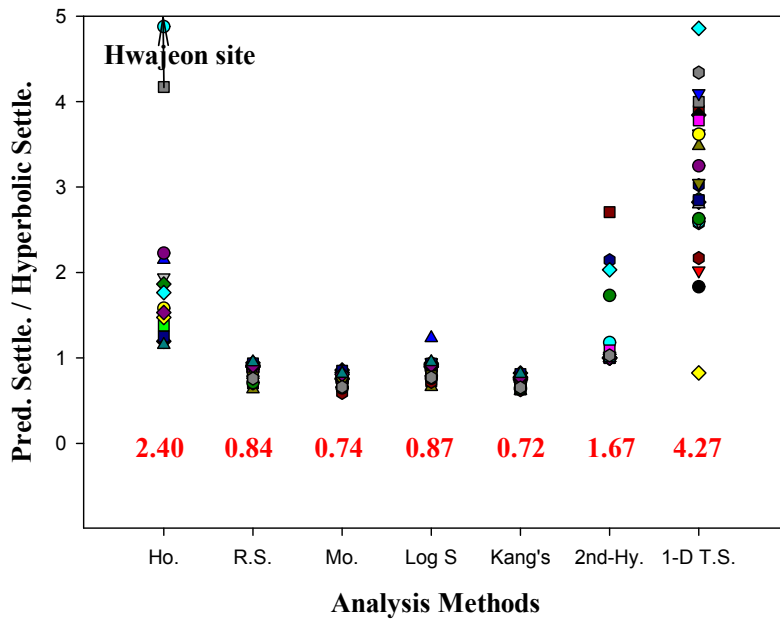


Fig. 6.3 Comparison of the settlements between prediction/Hyperbolic settlement and analysis methods(Hwajeon site)

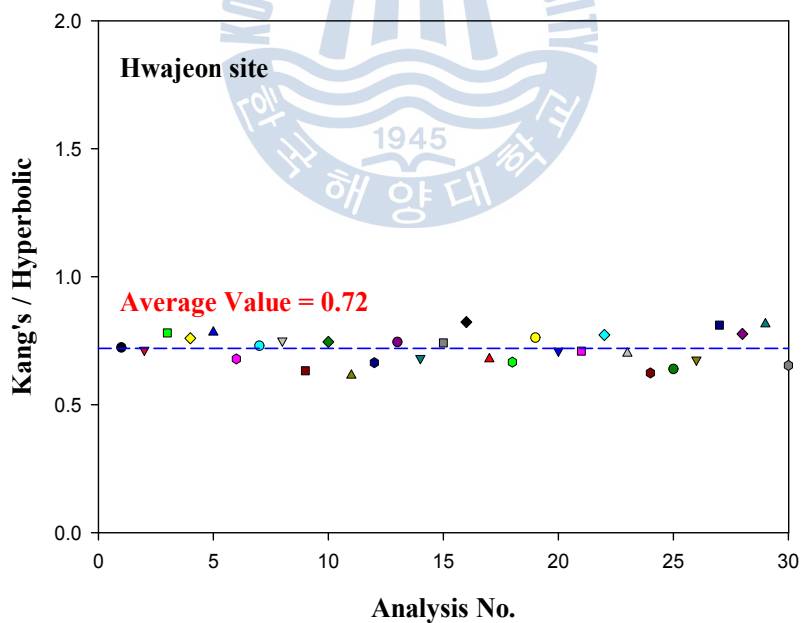


Fig. 6.4 Comparison of the settlements between Kang's/Hyperbolic settlement and analysis methods(Hwajeon site)

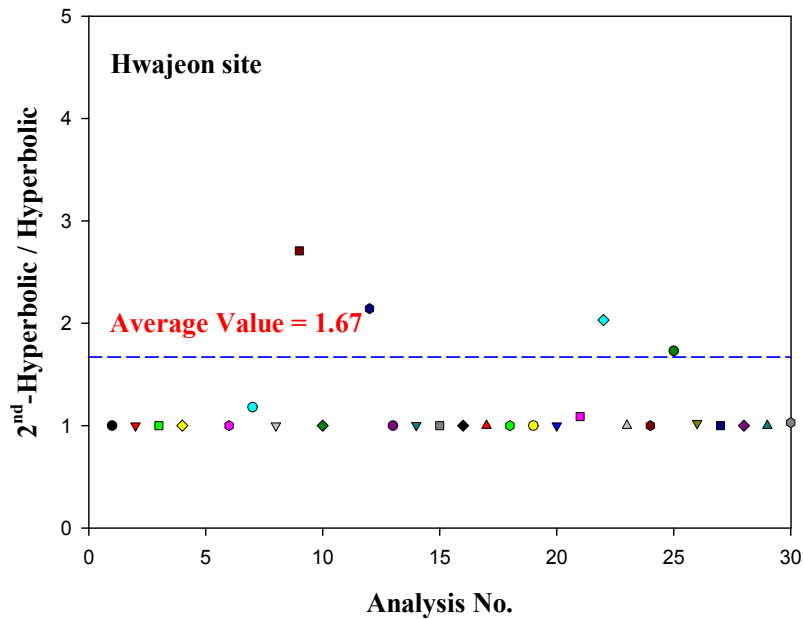


Fig. 6.5 Comparison of the settlements between 2nd-Hyperbolic/Hyperbolic settlement and analysis methods(Hwajeon site)

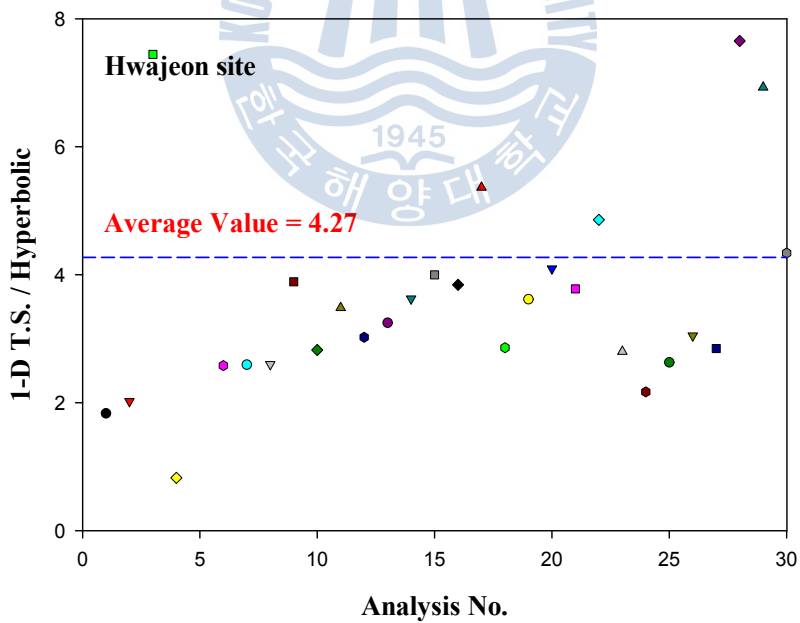


Fig. 6.6 Comparison of the settlements between 1-D Theory Simulation /Hyperbolic settlement and analysis methods(Hwajeon site)

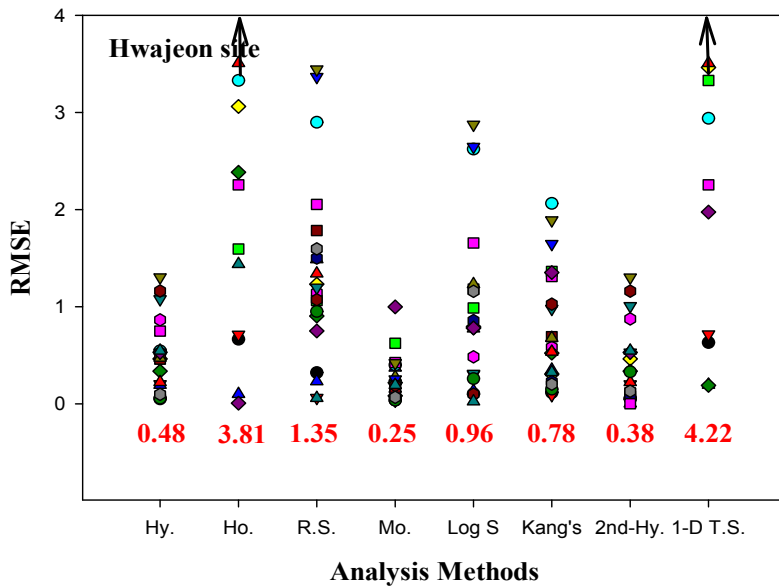


Fig. 6.7 Results of RMSE analysis(Hwajeon site)

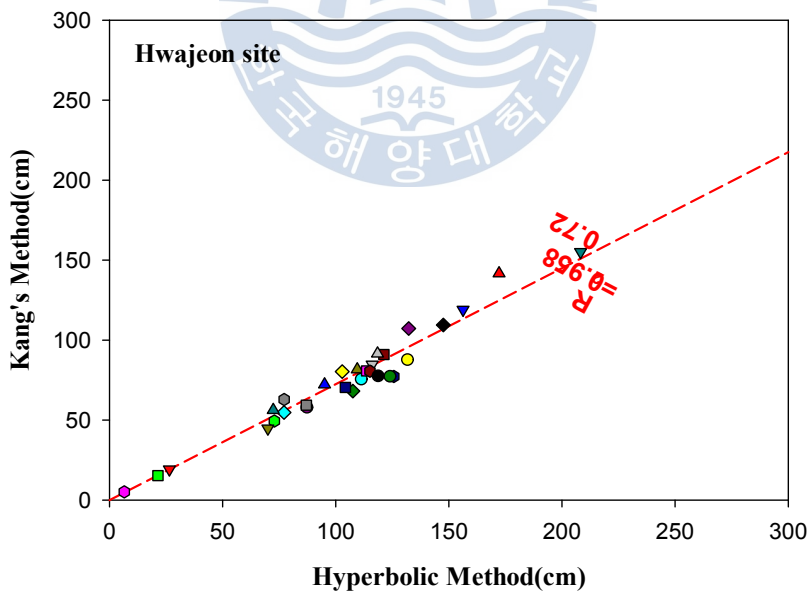


Fig. 6.8 Settlement correlation between Hyperbolic and Kang's methods (Hwajeon site)

6.1.2 Kang's법을 이용한 단계성토별 시간-침하량

연구 대상지역에서 계측된 현장 데이터를 이용하여 예측기법에서 역해석된 지반정수를 이용하여 단계성토별 시간-침하량 곡선을 예측하였다. 연구 대상지역에서는 연약지반 처리를 위해 수평배수재가 타설되었으므로 Kang's법으로 예측된 최종침하량과 압밀계수(C_v)를 이용하여 단계성토별 시간-침하량 곡선을 예측하였다.

Figs. 6.9~6.14는 Kang's법을 통해 얻어진 역해석 상수로 예측된 단계성토별 시간-침하량 곡선과 현장계측데이터를 함께 도시한 결과이다. Fig. 6.9(a)는 배수재가 설치되지 않은 P-1지역에 대해 1-D Theory Simulation법에 의해 얻어진 역해석 상수로 예측된 단계성토별 시간-침하량 곡선과 현장계측데이터와 함께 도시한 결과이다. 예측된 값과 계측된 값이 매우 상이함을 알 수 있다. Fig. 6.9(b)는 Kang's법을 통해 얻어진 역해석 상수로 이용하여 도시한 결과이다. 예측된 값과 계측된 값이 매우 일치함을 알 수 있다. 배수재가 설치되어있지 않음에도 불구하고 Kang's법에 의해 얻어진 시간-침하량 곡선이 1-D Theory Simulation법에 의한 결과보다 더 잘 일치하였다. 이러한 원인은 현장에서 배수재 타설과 미타설을 구역화하여 수행하였으나, 연약지반의 두께가 두꺼워 배수재 미타설 지역과 타설지역 간의 거리가 상대적으로 짧은 이유에 있다고 판단된다.

Figs. 6.10~6.12은 배수재가 2.0m 간격으로 타설된 P-3, P-4, SP-1 지역에 대해 Kang's법을 통해 얻어진 역해석 상수로 예측된 단계성토별 시간-침하량 곡선과 현장계측데이터와 함께 도시한 결과이다. 예측된 시간-침하량 곡선들과 현장 데이터 값들이 매우 잘 일치함을 보였다.

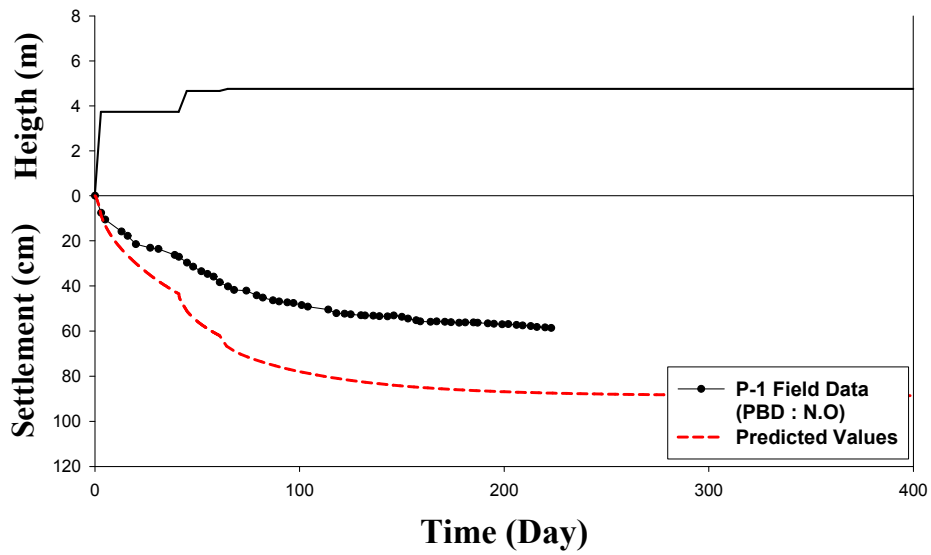
Figs. 6.13~6.14는 배수재가 2.0m 간격으로 타설된 P-57, P-60 지역에 대해 Kang's법을 통해 얻어진 역해석 상수로 예측된 단계 성토별 시간-침하량 곡선과 현장 계측데이터와 함께 도시한 결과이다.

예측된 시간-침하량 곡선이 현장 계측치와 매우 상이함을 보여 주는 예이다. 예측값과 계측값의 차이는 여러 원인이 있을 수 있는데 대표적으로 다음 두 가지를 들 수 있다.

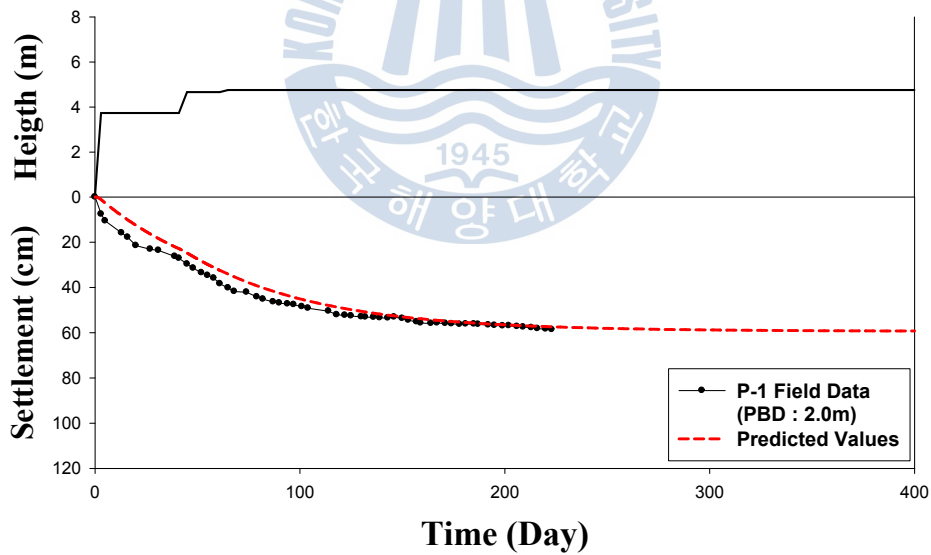
첫 번째는 현장 침하량 계측 자료가 성토하중에 따라 불규칙한 침하 경향을 보이는 경우이다. 예를 들어 단계성토 하중의 변화가 크지 않지만 침하량은 매우 크게 발생하는 경우에 해당된다. 두 번째는 성토 초기 침하량 계측의 누락이다. 이 경우는 초기 성토하중에 의해 침하가 일어나지 않다가 갑작스러운 침하가 발생하는 침하 패턴을 보인다. 상기의 결과들을 분석해 볼 때, 정확한 침하 예측을 위해서는 현장에서는 성토 현황과 하중 증감에 대한 내용들을 세심하게 계측 시 관리하여 기록하여야 할 것으로 판단된다. 추가적으로 초기 현장 계측치를 이용하여 단계별 성토에 대한 발생 시간-침하량 곡선 예측 시 다음과 같이 몇 가지 어려움이 있음을 고려하여야 한다.

일반적으로 현장 지층은 지층 특성이 다른 여러 층으로 이루어져 있어 현장 계측치를 이용한 역해석 결과를 이용하여 산정된 지반 상수에 대한 부분적 적용은 난이하다. 초기 성토 단계시에는 일정한 성토고로 계측되어지는 기간이 매우 짧아 데이터 부재에 의한 신뢰성 있는 분석이 힘들다. 초기에는 성토고 변화가 많으며, 작은 성토 하중에 의한 침하량을 이용시 지하수위 또는 차량하중 등의 영향으로 예측값의 오차가 크게 나타난다. 초기 성토시에는 점성토 층의 압밀에 의한 침하보다는 사질토층 및 점성토층의 즉시 침하가 상대적으로 크게 발생하므로 침하 곡선 형태가 양호하지 않아 분석이 난해한 경향을 가진다. 장비 주행성 또는 장비 타설을 위한 복토 설치 시의 초기 침하를 일반적으로 현장 여건상 계측하기 어려워 해석에 반영되기 힘들다.

화전지구 다른 지역에 대한 침하량 예측 결과는 부록 H에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.



(a) 1-D Theory Simulation



(b) Kang's method

Fig. 6.9 Predicted time - settlement curve(P-1 zone)

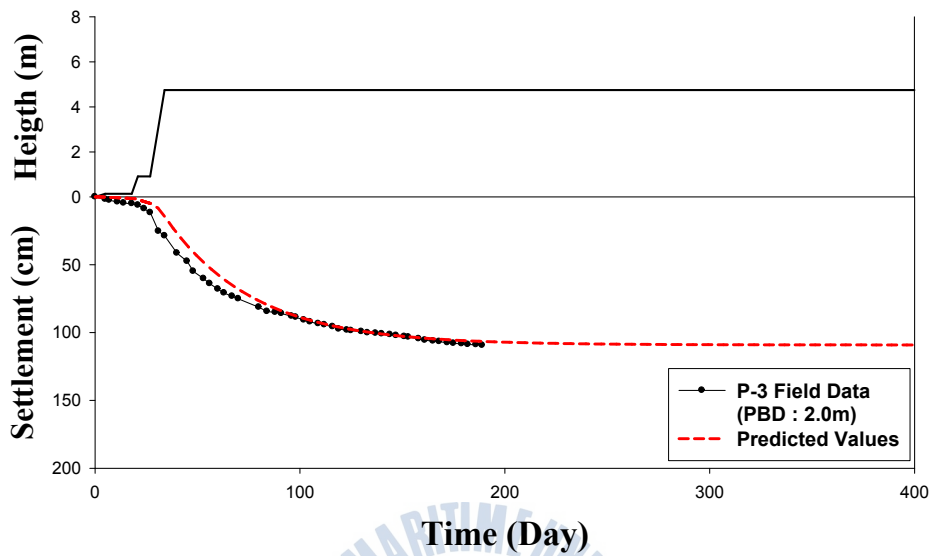


Fig. 6.10 Time - settlement curve predicted by Kang's method(P-3 zone)

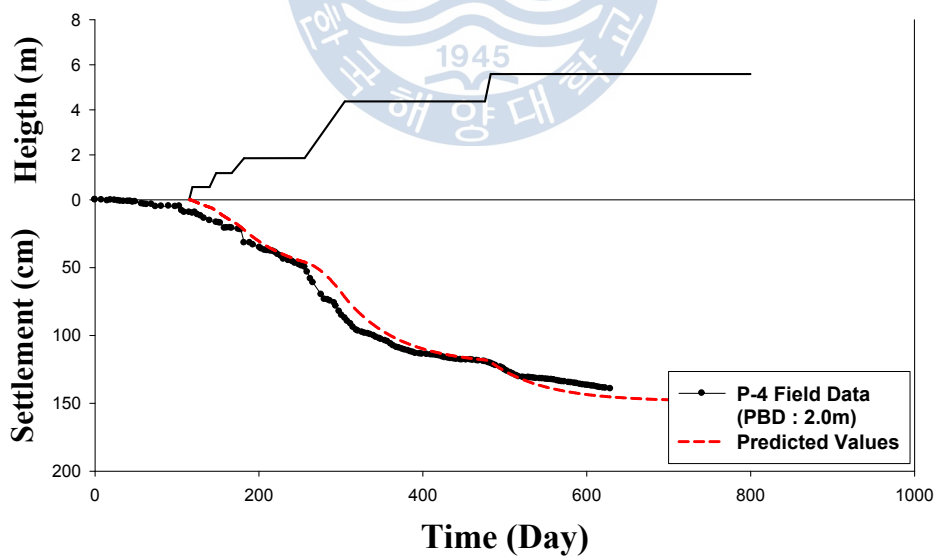


Fig. 6.11 Time - settlement curve predicted by Kang's method(P-4 zone)

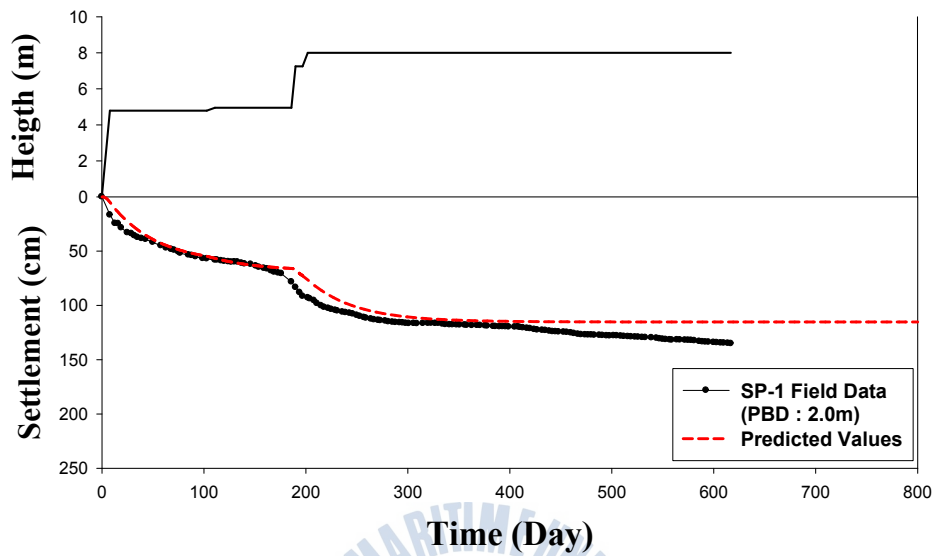


Fig. 6.12 Time - settlement curve predicted by Kang's method(SP-1 zone)

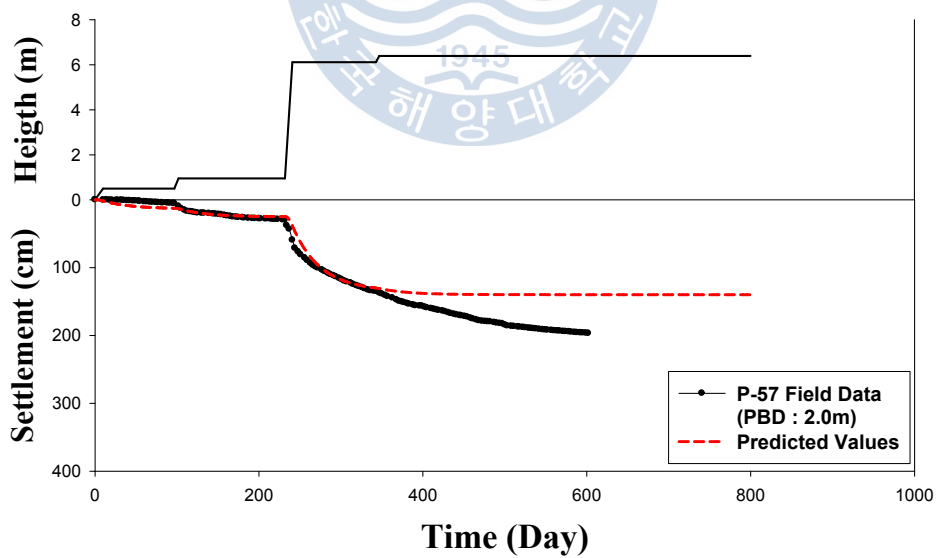


Fig. 6.13 Time - settlement curve predicted by Kang's method(P-57 zone)

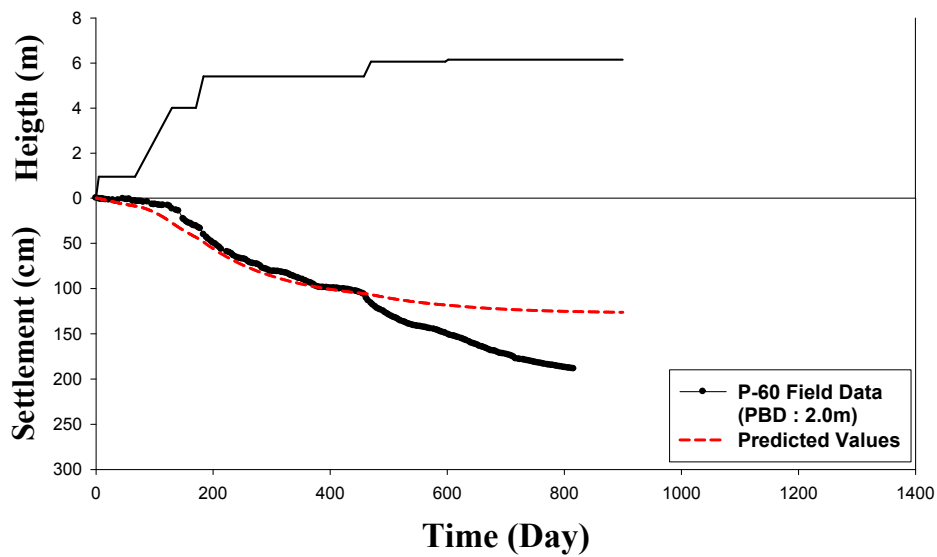
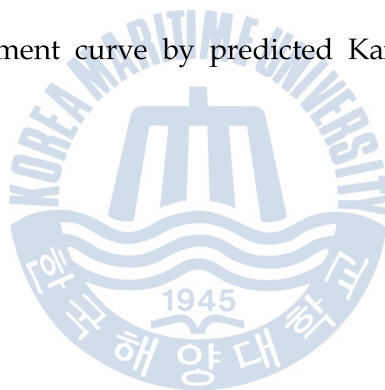


Fig. 6.14 Time - settlement curve by predicted Kang's method(P-60 zone)



6.2 미음지구

6.2.1 최종침하량 산정 결과 및 분석

미음지구에서 계측된 시간-침하량 곡선에 대하여 평균압밀도 변화에 따른 각종 예측기법을 통해 산정된 예측 침하량을 산정한 결과는 Table 6.2과 Fig. 6.15과 같다. 미음지구 각 지역 별 각각의 예측법에 따른 침하량 예측 결과는 부록 I에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.

미음지구에서 산정된 예측 침하량을 예측기법 별로 분석해 보면 다음과 같다. Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 Fig. 6.15에서 알 수 있듯이 전체적으로 \sqrt{S} 법, Monden법, Log S법, Kang's법과 비슷한 값과 경향을 보여주고 있다.

\sqrt{S} 법에 의한 방법은 Monden법, Log S법, Kang's법과 함께 Hyperbolic과 비슷한 경향을 보이며 Hyperbolic법보다 대체로 작은 값을 예측하였다. 2nd-Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 Hyperbolic법에 비해 전체적으로 일정한 경향을 보이지 않고 불규칙한 것으로 나타났다. 1-D Theory Simulation법에 의한 방법은 Hoshino법과 유사하게 큰 값을 예측하고 값의 분포도 매우 산만하게 분포하는 경향을 보였다.

Fig. 6.16는 예측기법 침하량/보편적 평균 예측침하량 비교를 도시한 결과이다. Fig. 6.16에서 알 수 있듯이 1-D Theory Simulation법, 2nd-Hyperbolic법, Hyperbolic법, Log S법, Monden법, \sqrt{S} 법, Kang's법 순으로 2.07, 1.79, 1.30, 0.95, 0.88, 0.87, 0.82의 비를 보였으며, Log S법이 보편적 평균 예측침하량과 가장 근사한 값을 예측하였다.

Figs. 6.17~6.20은 예측기법 침하량 / Hyperbolic법 예측침하량 비교를 도시한 결과이다. Fig. 6.17에서 알 수 있듯이 1-D Theory Simulation법, 2nd-Hyperbolic법, Log S법, Monden법, \sqrt{S} 법, Kang's법 순으로 1.61, 1.39, 0.74, 0.68, 0.68, 0.63의 비를 보였으며, Log S법이 0.74배의 비로 쌍곡선 예측침하량과 가장 근사한 값을 예측하였다.

Fig. 6.18는 Kang's법/Hyperbolic법 예측침하량 비교를 도시한 결과이다. Fig.

6.17과 같이 참고해 볼 때, Kang's법에 의한 예측침하량은 Hyperbolic법의 예측침하량보다 0.63배 작았지만, 경향성은 다른 방법들에 비해 가장 잘 일치하였다.

Fig. 6.19는 2nd-Hyperbolic법/Hyperbolic법 예측침하량 비교를 도시한 결과이다. 2nd-Hyperbolic법에 의한 침하량 예측 방법은 Hyperbolic법에 비해 전체적으로 일정한 경향을 보이지 않고 불규칙하게 값을 예측하여, 평균 1.39배 큰 값을 예측하였다.

Fig. 6.20는 1-D Theory Simulation법/Hyperbolic법 예측침하량 비교를 도시한 결과이다. 1-D Theory Simulation법은 2nd-Hyperbolic법과 같이 전체적으로 일정한 경향을 보이지 않고 불규칙적으로 값을 예측하여, 평균 1.61배 큰 값을 예측하였다.

Fig. 6.21의 미음지구의 각종 예측법 RMSE 산정값을 결과에서 알 수 있듯이 RMSE 산정값이 Hoshino법, 1-D Theory Simulation법, \sqrt{S} 법, Log S법, Kang's법 Hyperbolic법, Monden법, 2nd-Hyperbolic법 순으로 각각 4.22, 3.66, 1.49, 1.03, 0.61, 0.33, 0.15, 0.11의 값을 보여, RMSE 값으로만 판단할 경우 화전지역과는 달리 2nd-Hyperbolic법이 가장 신뢰도가 높은 것으로 평가되었다. Kang's법은 RMSE값이 Moden법, Hyperbolic법 및 2nd-Hyperbolic법보다 크게 나타났다. 화전지역과 동일하게 Kang's법의 RMSE를 실제 침하량으로 환산하면 매우 작은 값으로 다른 방법에 비해 신뢰성이 확보되어 있음을 보여 준다.

Fig. 6.22에서는 Hyperbolic법과 Kang's법의 상관관계 결정계수 R^2 가 0.974로 화전지역보다 더 높은 상관관계를 보이고 있어 Kang's법의 신뢰성이 높음을 간접적으로 재확인할 수 있다.

Table 6.2 Comparison of the final settlements predicted by each method(Meeum site)

Zone	Prediction Settlement(cm)								Remark
	Hyperbolic Method	Hoshino Method	√S Method	Monden Method	Log S Method	Kang's Method	2Hyperbolic Method	1-D Method	
S-0	111.4	-	77.1	76.7	80.1	70.6	111.4	151.7	- indicates unpredictable.
S-65	37.9	-	30.5	31.9	33.5	26.5	88.7	65.8	
S-72	51.2	-	30.0	31.7	37.5	30.6	113.5	74.7	
S-93	68.6	-	41.4	49.6	47.3	41.5	101.6	49.6	
S-102	87.1	-	67.3	58.4	69.1	57.4	87.1	195.3	
S-111	100.9	-	49.0	57.5	57.1	56.6	100.9	116.5	
S-124	102.1	-	59.3	62.2	64.4	60.2	119.4	200.3	
S-130	53.1	-	42.6	36.6	45.1	35.9	53.1	131.9	
S-131	166.6	-	131.0	116.1	130.8	113.1	213.8	232.5	
Note	- The soft ground of study site was improved almost every part of area by a vertical drain.								

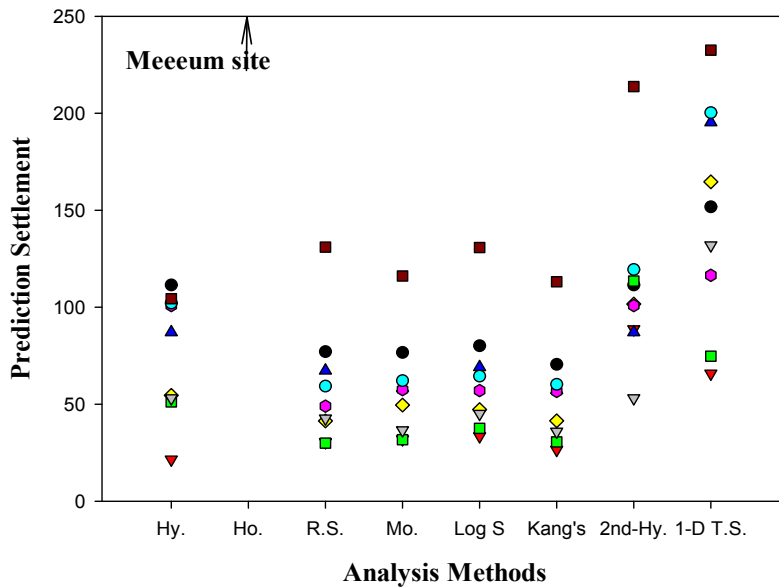


Fig. 6.15 Comparison of the final settlements predicted by each method
(Meeum site)

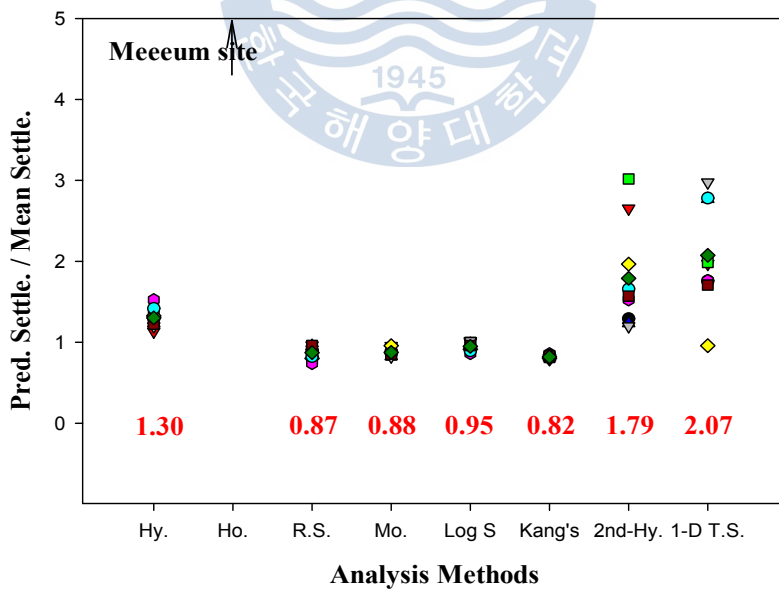


Fig. 6.16 Comparison of settlements between prediction/mean settlement and analysis methods(Meeum site)

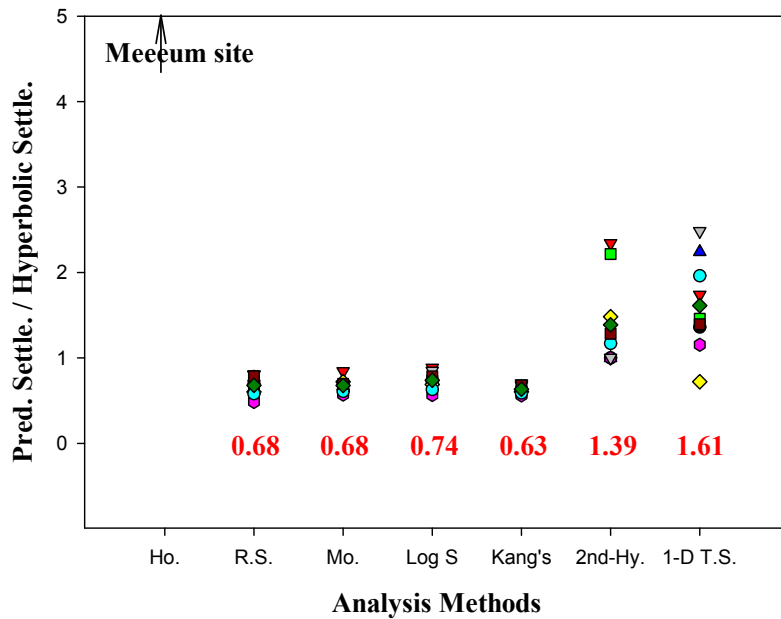


Fig. 6.17 Comparison of the settlements between prediction/Hyperbolic settlement and analysis methods(Meeum site)

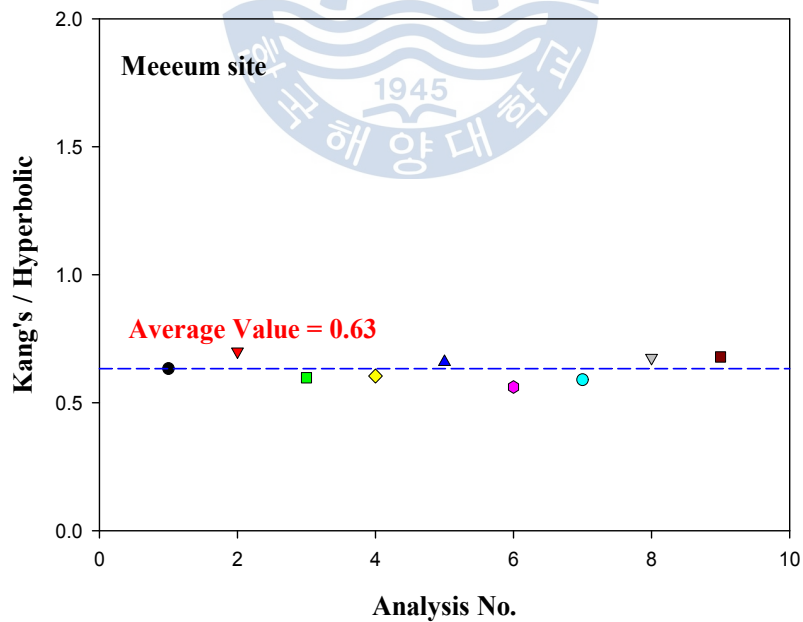


Fig. 6.18 Comparison of the settlements between Kang's/Hyperbolic settlement and other analysis methods(Meeum site)

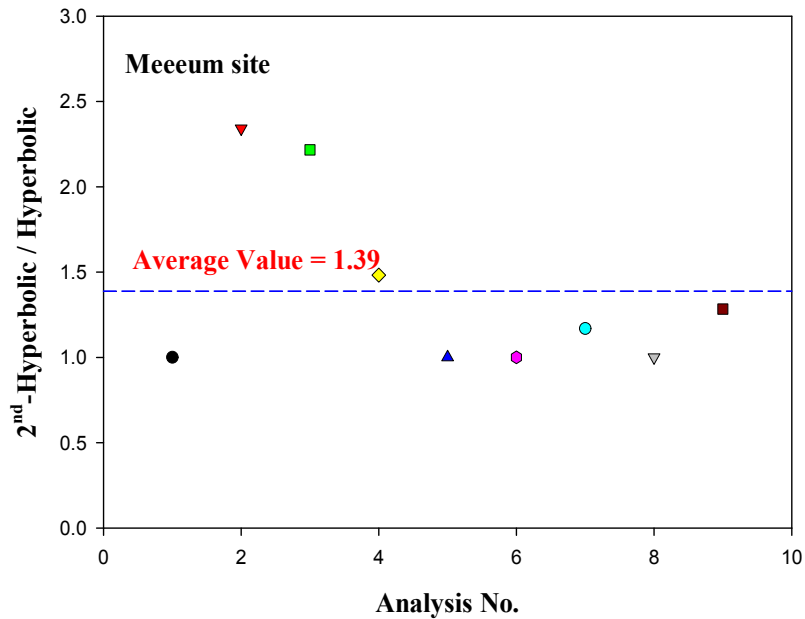


Fig. 6.19 Comparison of the settlements between 2nd-Hyperbolic/Hyperbolic settlement and analysis methods(Meeum site)

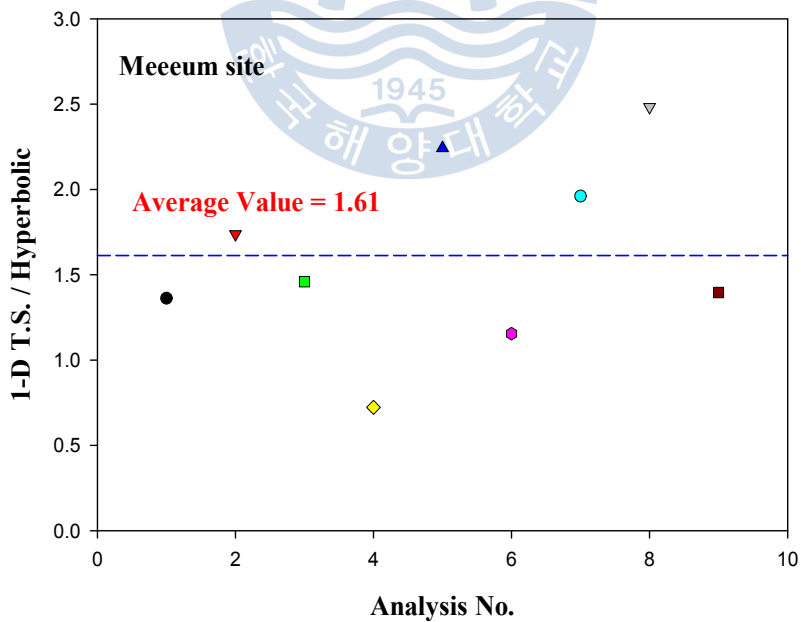


Fig. 6.20 Comparison of the settlements between 1-D Theory Simulation /Hyperbolic settlement and analysis methods(Meeum site)

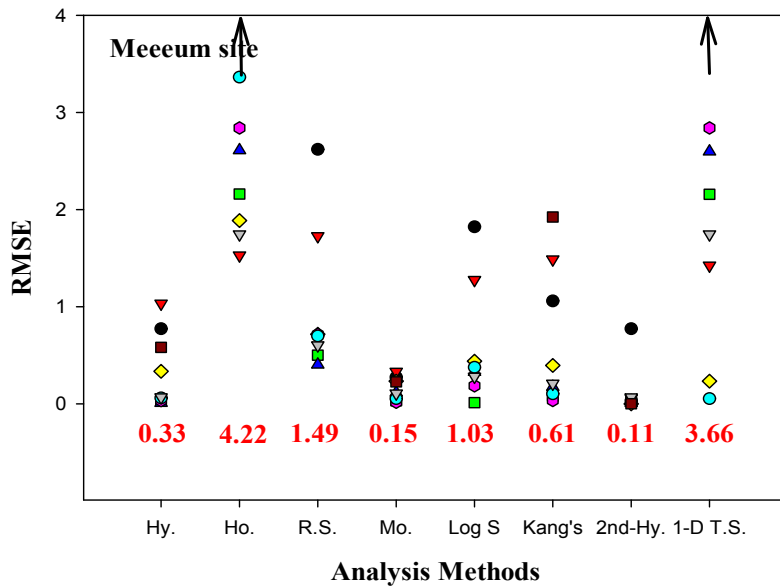


Fig. 6.21 Results of RMSE analysis(Meeum site)

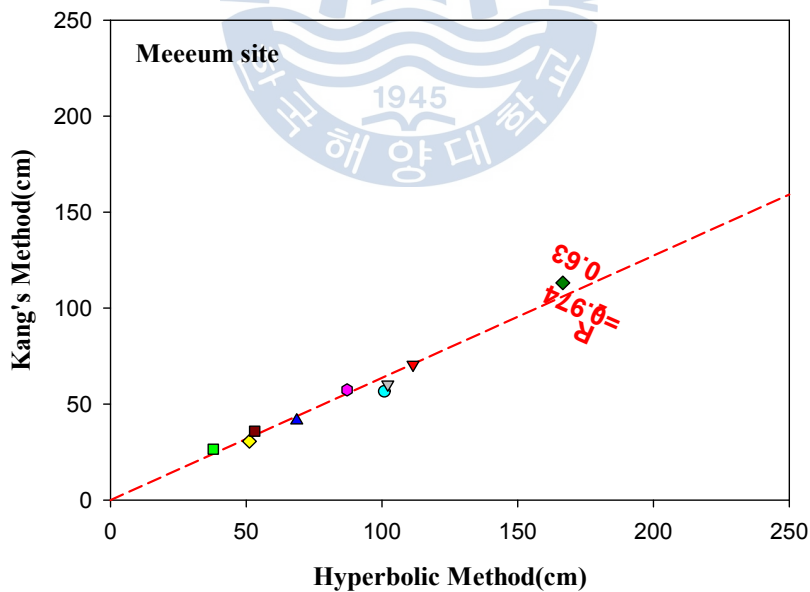


Fig. 6.22 Settlement correlation between Hyperbolic and Kang's methods (Meeum site)

6.2.2 Kang's법을 이용한 단계성토별 시간-침하량

연구 대상 미음지구에서는 연약지반 처리를 위해 수평배수재가 타설되었으므로 Kang's법으로 예측된 최종침하량과 압밀계수(C_v)를 이용하여 단계성토별 시간-침하량 곡선을 예측하고자 한다.

Figs. 6.23~6.26는 Kang's법을 통해 얻어진 역해석 상수로 예측된 단계성토별 시간-침하량 곡선과 현장계측데이터와 함께 도시한 결과이다. Figs. 6.23~24은 배수재가 각각 1.2m, 2.0m 간격으로 타설된 S-0, S-131 지역에 대해 Kang's법을 통해 얻어진 역해석 상수로 예측된 단계 성토별 시간-침하량 곡선과 현장계측 데이터와 함께 도시한 결과이다. 예측된 시간-침하량 곡선들과 현장 데이터 값들이 매우 잘 일치함을 보였다.

Figs. 6.25~26는 배수재가 각각 1.7m, 1.6m 간격으로 타설된 S-0, S-131 지역에 대해 Kang's법을 통해 얻어진 역해석 상수로 예측된 단계성토별 시간-침하량 곡선과 현장계측데이터와 함께 도시한 결과이다. 예측된 시간-침하량 곡선들과 현장 데이터 값들이 최종 성토고에서 상이한 결과를 보여주고 있다. 이러한 원인은, 현장에서 초기 성토시 계측이 이루어지지 않아 초기에 발생한 침하량을 고려하지 않고 역해석을 수행할 수밖에 없어 상수값의 신뢰성이 많이 떨어진 것으로 판단된다. 성토관리를 위해서 계측기 파손의 우려가 있음에도 불구하고 성토 전 계측기를 매설하여 초기 침하량 또는 침하 경향을 아는 것이 경제적인면 뿐 아니라 공기 관리 측면에서도 더욱 바람직할 것으로 판단된다.

미음지구 다른 지역에 대한 침하량 예측 결과는 부록 J에 도시되어 있으므로 이를 참고하기 바란다.

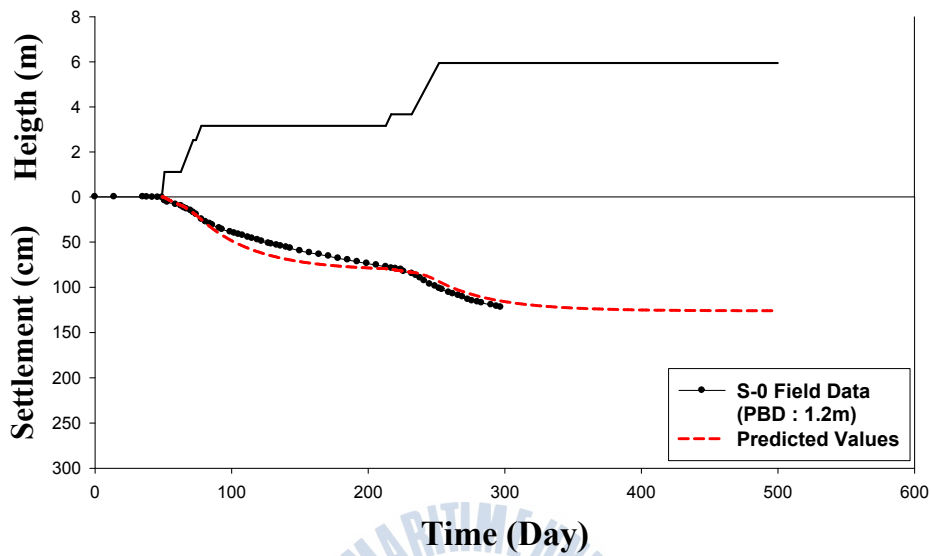


Fig. 6.23 Time - settlement curve predicted by Kang's method(S-0 zone)

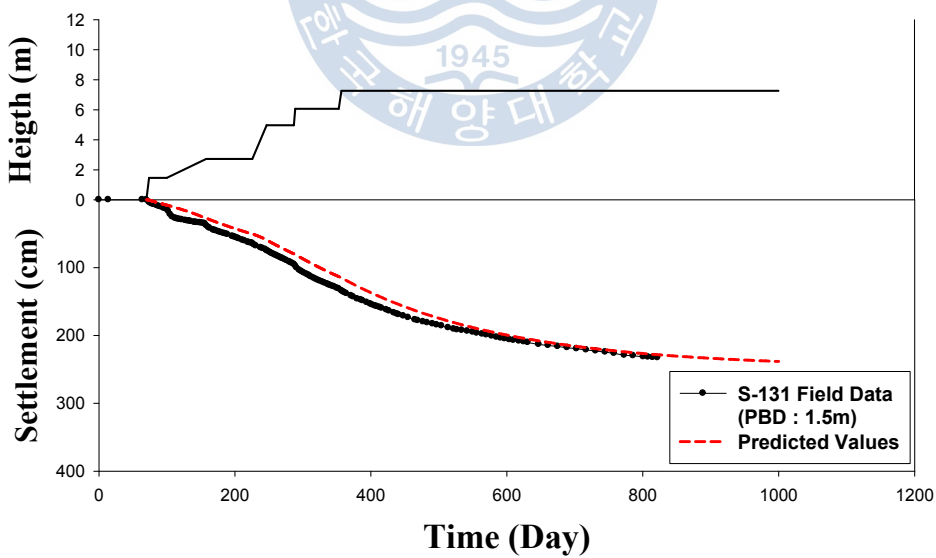


Fig. 6.24 Time - settlement curve predicted by Kang's method(S-131 zone)

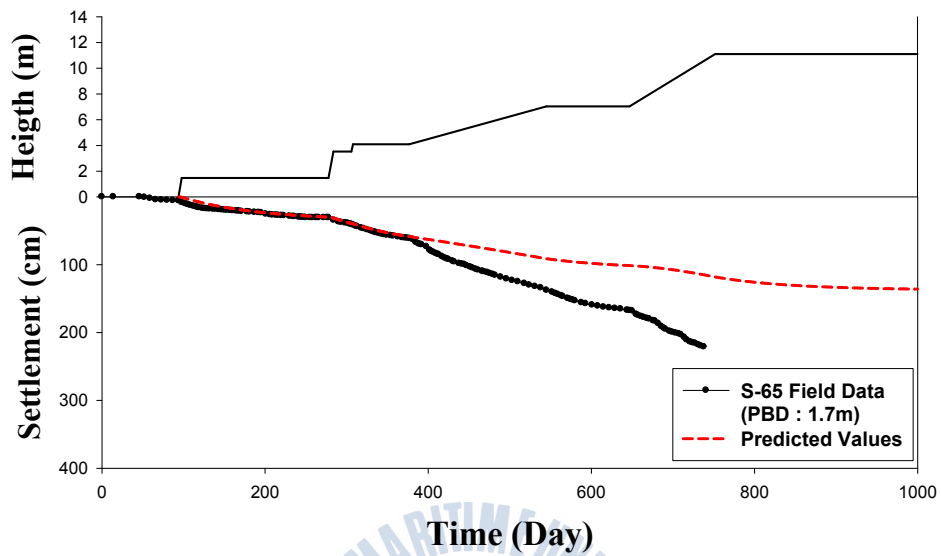


Fig. 6.25 Time - settlement curve predicted by Kang's method(S-65 zone)

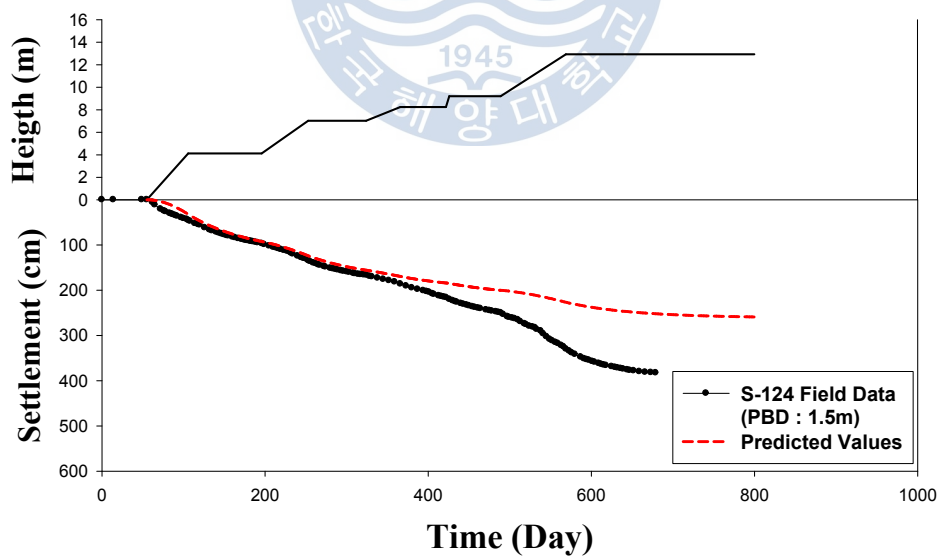


Fig. 6.26 Time - settlement curve predicted by Kang's method(S-124 zone)

6.3 성토 단계별 시간-침하량 곡선의 변화

Kang's법을 이용한 단계 성토별 시간-침하량 곡선 예측을 위해서는 선행적으로 어떤 단계에서 해석을 수행하여, 현재 침하량을 고려한 역해석 상수 C_c , C_h 를 재 산정하여야 한다. 이러한 해석 수행시, 연구의 목적상 최초 성토단계에서의 침하 자료를 이용하여 해석을 수행하면 이상적인 연구 결과를 얻을 수 있지만, 실제 현장에서의 계측 자료는 초기 성토 단계에서는 성토 이후 방치기간이 매우 짧아 해석을 수행하는데 많은 문제점들을 내포할 수 있다. 따라서 본 절에서는 해석 가능한 지점을 선정하여, 성토 단계별로 역해석 상수를 재 산정하여, 그 역해석 상수로 얻어지는 단계성토별 시간-침하량 곡선을 비교해 보았다.

화전지구의 P-4 지역에 대해, Fig. 6.27은 A단계, B단계 및 C단계에서 Kang's법을 이용하여, 각각의 역해석 상수를 결정하여 각 단계별 시간 침하곡선을 산정한 결과이다. 해석 결과, A단계, B단계 및 C단계에서 예측한 시간-침하량 곡선이 모두 매우 잘 일치하며, 현장의 시간-침하량 곡선을 잘 예측한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6.28은 화전지구의 또 다른 구역 P-19 지점에 대한 성토 단계별 Kang's법을 이용하여, 각각의 역해석 상수를 결정하여 각 단계별 시간 침하곡선을 산정한 결과이다. 해석 결과, B단계 및 C단계에서 예측한 시간-침하량 곡선이 모두 매우 잘 일치하며, 현장 곡선의 시간-침하량 곡선을 잘 예측하나, A단계에서 예측한 시간-침하량 곡선은 B단계 및 C단계에서 예측한 시간-침하량 곡선과 다른 경향을 보일 뿐 아니라, 현장의 시간-침하량 곡선에 대해서도 잘 예측하지 못했다.

상기의 결과를 종합해 볼 때, 하중 변화에 따른 침하 경향이 일반적인 경향성을 가지는 현장-침하량 곡선에 대해서는 어떤 성토단계에서도 Kang's법을 이용한 역해석 상수로 단계별 시간-침하량곡선을 예측하여도 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

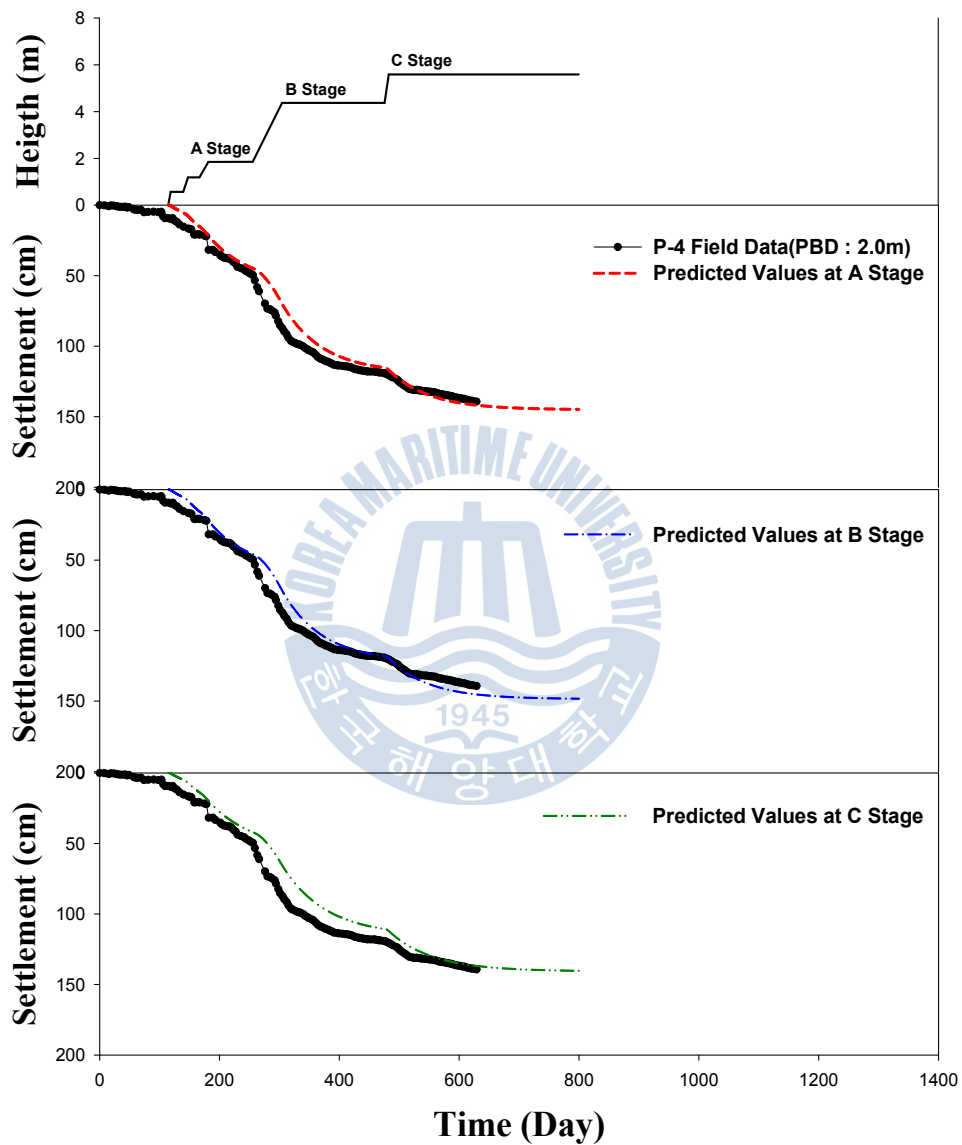


Fig. 6.27 Time - settlement curve predicted by Kang's method according to staged filling (P-4 zone)

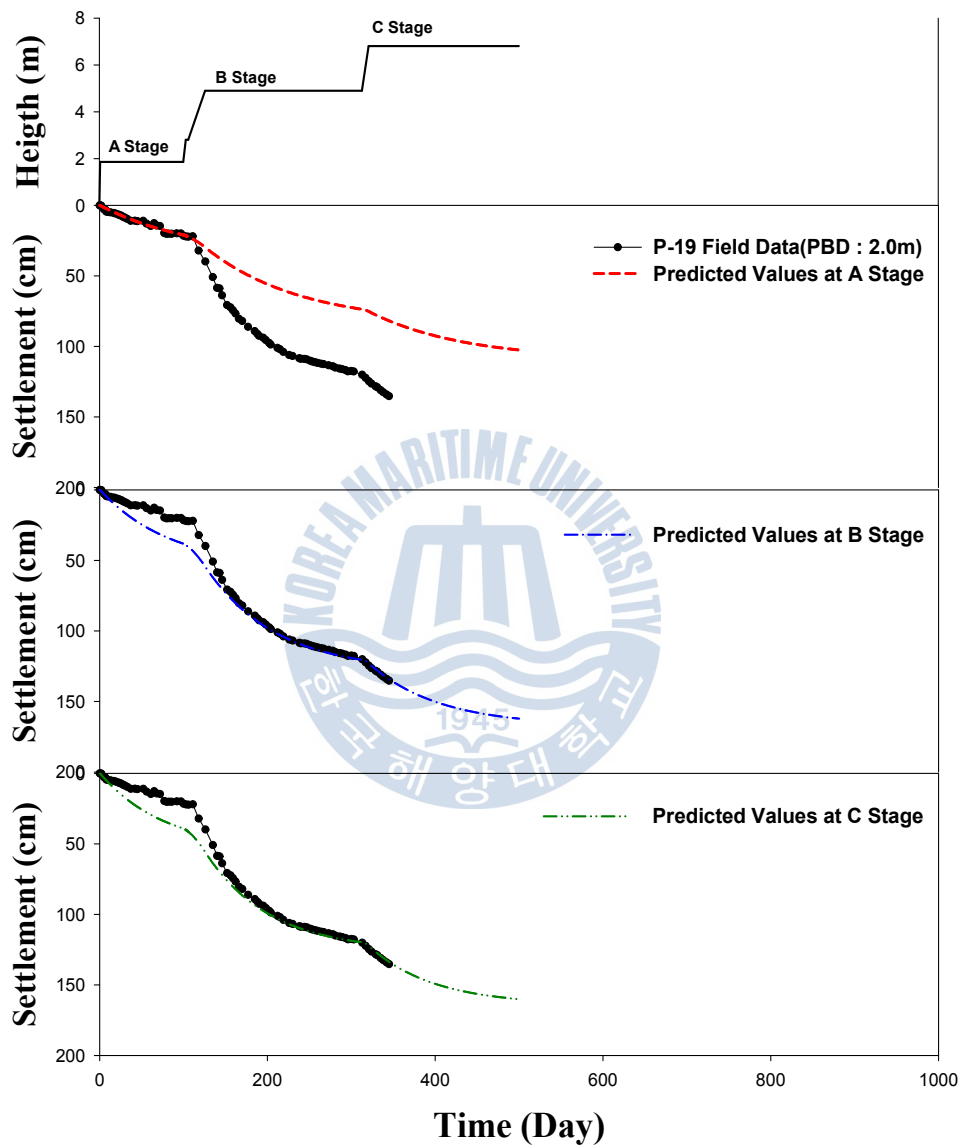


Fig. 6.28 Time - settlement curve predicted by Kang's method according to staged filling (P-19 zone)

6.4 요약

본 장에서는 제안된 방법의 실제 적용 단계로 현장계측치를 이용하여 새로 제시된 침하 예측법들로 침하량을 예측하여 다른 기존 침하량 예측법처럼 사용이 가능한지를 상호 신뢰도 분석을 통해 검증하였다. 또한 초기 성토단계에서 계측된 시간-침하량 데이터를 Kang's법으로 분석하여 지반정수를 산정하여 다음 단계 성토시 발생할 시간-침하량 곡선을 도식하여 침하량을 예측하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

예측된 침하량과 계측된 침하계측자료의 편차를 정의하는 Root Mean Square Error를 이용하여 신뢰도 평가 결과 1-D Theory Simulation법, Hoshino법, \sqrt{S} 법, Log S법, Kang's법 Hyperbolic법, 2nd-Hyperbolic법, Monden법 순으로 각각 4.22, 3.81, 1.35, 0.96, 0.78, 0.48, 0.38, 0.25의 값을 보였다. RMSE 값으로만 판단할 경우 Monden법이 가장 신뢰도가 높은 것으로 평가되었다. Kang's법은 RMSE값이 Hyperbolic법, 2nd-Hyperbolic법 및 Moden법보다 크게 나타났다. 하지만 Kang's법의 RMSE를 실제 침하량으로 환산하면 매우 작은 값으로 다른 방법에 비해 신뢰성이 확보되어 있음을 보여 준다. Hyperbolic법과 Kang's법의 상관관계 결정계수 R^2 가 0.958로 높은 상관관계를 보이고 있어 Kang's법의 신뢰성이 높음을 간접적으로 확인할 수 있다.

연구 대상지역 화전지구, 미음지구에서는 연약지반 처리를 위해 수평배수재가 타설되었으므로 제안된 Kang's법으로 예측된 최종침하량과 압밀계수(C_v)를 이용하여 단계성토별 시간-침하량 곡선을 예측하였다. Kang's법을 이용한 단계성토별 시간-침하량곡선을 예측한 경우, 예측된 시간-침하량 곡선들과 현장 데이터 값들이 매우 잘 일치함을 보였다. 화전지구에서는 일부 배수재가 설치되어있지 않은 구역에서도 Kang's법에 의해 얻어진 시간-침하량 곡선이 1-D Theory Simulation법에 의한 결과보다 더 잘 일치하였다. 이러한 원인은 현장에서 배수재 타설과 미타설을 구역화하여 수행하였으나, 연약지반의 두께가 두꺼워 배수재 미타설 지역과 타설지역 간의 거리가 상대적으로 짧은 이유에 있다고 판단된다. 하지만 일부에서는 예측된 시간-침하량 곡선들과 현장 데이터 값들이 최종 성토고에서 상이한 결과를 보여주고 있다. 이것은 현장 침하량 계

측 자료가 성토하중에 따라 불규칙한 침하 경향을 보이는 경우에 발생하는 것으로 나타났다. 또한 현장에서 초기 성토시 계측이 이루어지지 않아 초기에 발생한 침하량을 고려하지 않고 역해석을 수행할 수밖에 없어 상수값의 신뢰성이 많이 떨어졌기 때문에 판단된다. 성토관리를 위해서 계측기 파손의 우려가 있음에도 불구하고 성토 전 계측기를 매설하여 초기 침하량 또는 침하 경향을 아는 것이 경제적인뿐만 아니라 공기 관리 측면에서도 더욱 바람직할 것으로 판단된다.

Kang's법을 이용한 단계성토별 시간-침하량 곡선을 예측한 결과 하중 변화에 따른 침하 경향이 일반적인 경향성을 가지는 현장-침하량 곡선에 대해서는 어떤 성토단계에서도 Kang's법을 이용한 역해석 상수로 단계별 시간-침하량곡선을 예측하여도 좋은 결과를 얻을 수 있었다.



제 7 장 결론

본 연구에서 제안한 침하량 예측기법은 수평배수이론을 바탕으로 하는 Kang's법, Hyperbolic법을 변형한 2nd-Hyperbolic법, Terzaghi 일차압밀이론을 이용한 1-D Theory Simulation법이다. 새롭게 제시된 방법은 선행 검증단계와 실제 적용단계를 거쳐 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 새롭게 제시된 방법의 선행 검증 단계로 1차원 압밀이론(Terzaghi's theory), 수평배수이론 및 유한요소해석 프로그램을 이용하여 산정된 시간-침하 곡선을 이용하여 기존 및 새로 제시된 예측기법으로 최종침하량을 산정하여 그 결과 분석을 통해 새로 제안된 침하량 예측기법들의 경향성 및 장·단점을 분석하였다.

- Terzaghi's theory의 시간-침하량 곡선을 이용하여 제시된 침하예측기법들의 경향은 다음과 같다. Kang's법에 의한 예측 침하량은 전체적으로 Terzaghi's theory 침하량보다 작은 값을 예측하였으며, \bar{U} 가 증가할수록 이론 침하량 값과 근접하게 값을 예측하였다. 2nd-Hyperbolic법에 의한 침하량은 초기에는 Terzaghi's theory 침하량보다 작은 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 70%가 되었을 때 Terzaghi's theory 침하량보다 큰 값을 예측하였다. 1-D Theory Simulation법에 의한 침하량 예측 방법은 초기에는 Terzaghi's theory 침하량보다 큰 값을 예측하다가 평균압밀도 \bar{U} 가 70% 이후부터는 Terzaghi's theory 침하량에 거의 근접한 값들을 예측하였다. Terzaghi's theory 침하량과 거의 같은 식을 이용하므로 예측 침하량 값도 가장 신뢰성 있게 평가되었다.
- 수평배수이론에 의한 시간-침하량 곡선을 이용하여 제시된 침하예측기법들의 경향은 다음과 같다. Kang's법에 의한 예측 방법은 초기부터 수평배수이론 침하량을 정확하게 예측함을 알 수 있었다. 2nd-Hyperbolic법에 의한 침

하량 예측 방법은 Hyperbolic법과 전반에 걸쳐 거의 동일한 값과 경향을 보였다. 1-D Theory Simulation법에 의한 침하량 예측은 전체적으로 수평배수 이론 침하량보다 매우 큰 값을 예측하였으며, 압밀도에 따라 최종 예측값이 일정한 경향성을 보이지 않고 불규칙하게 예측되었다. 이는 배수재 설치에 따른 배수거리를 고려하지 않은 영향이라 판단되어진다.

- 유한요소해석에 의한 시간-침하량 곡선을 이용하여 제시된 침하예측기법들의 경향은 다음과 같다. Kang's법에 의한 예측침하량은 Hyperbolic법의 예측 침하량보다 0.81배 작았지만, 경향성은 다른 방법들에 비해 가장 잘 일치하였다. 2nd-Hyperbolic법은 전체적으로 Hyperbolic법보다 뚜렷한 경향을 보이지 않았으며 1.23배 큰 값을 예측하였다. 1-D Theory Simulation법은 Hyperbolic법보다 0.98배 큰 값을 예측하였다. 여기서는 1-D Theory Simulation법이 Hyperbolic법과 가장 일정한 상관성을 보임을 알 수 있다.

2) 제안된 침하 예측법의 현장 검증을 위해 배수재가 시공된 낙동강 하구 지역에 위치하는 두 개 지역이 선정되었다. 제안된 Kang's법, 2nd-Hyperbolic법 및 1-D Theory Simulation법을 이용하여 최종침하량을 산정하여 그 결과를 현장 계측치와 비교·분석하였다. 또한 Kang's법을 이용하여 초기 성토단계에서 얻어지는 역해석 상수로 단계별 시간-침하량 곡선에 예측하여 현장 계측데이터와 비교하였다.

- Kang's법이 Hyperbolic법과 Monden법 등 다른 방법들에 비해 최종침하량을 작게 예측하나 각 방법 간의 상관성이 어느 정도 신뢰할 수 있는 범위에 분포하고 있어 최종침하량 예측에 Kang's법을 사용 가능함을 확인할 수 있었다. 또한, 기존의 예측법으로 재현하기 어려운 단계성토에서 발생하는 시간-침하량 곡선을 Kang's법을 사용하여 초기 성토단계의 침하를 분석하여 시간-침하량 곡선을 산정한 결과, Kang's법으로 산정된 시간-침하량 곡선은 현장계측치와 대체로 잘 일치하는 결과들을 보였다. 이러한 결과를 미루어 볼 때, Kang's법에 의한 단계성토별 시간-침하량 곡선 예측이 어느 정도 현장 시공관리에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다. 향후 더 광범위한 지역에 대해서 신뢰성 있는 Kang's법 적용성을 증명하기 위해 후속 연구를 수행할 필요가 있다.

- 2nd-Hyperbolic법은 Hyperbolic법이 결과와 비교해 볼 때, Terzaghi's theory 침하량, 유한요소해석 침하량 및 현장 침하량에 대해서 큰 값을 예측하였으나 수평배수이론 침하량에 대해서는 거의 동일한 값을 보였다. 또한 Hoshino법에 의해 예측침하량보다 신뢰성 높은 것으로 나타났다.
- 1-D Theory Simulation법은 Terzaghi's theory 침하량에 대한 예측에서는 가장 신뢰성 있는 결과를 보였으며, 유한요소해석 침하량에 대한 예측에서는 Hyperbolic법이 거의 유사한 값을 예측하였다. 연직배수재가 타설된 현장 침하량 및 수평배수이론 침하량에 대해서는 일정한 경향성을 보이지 않으며 매우 불규칙한 과다한 결과를 예측하였다.
- 본 연구에서 제시한 2nd-Hyperbolic법과 1-D Theory Simulation법의 장점들을 고려해 볼 때, 차후 더 많은 현장에 대하여 분석을 수행하여 이들 예측법의 적용성 검증을 수행할 필요가 있으리라 판단된다.



참 고 문 헌

- 김승흠 (2007), "연약지반에서의 현장 실측 침하량과 이론식에 의한 압밀침하량의 비교 연구", 대전대학교 대학원 석사학위논문
- 김영남, 이강일 (1996), "연직배수공법", 한국지반공학회 연약지반처리위원회 현 지세미나 자료집.
- 김윤태 (1997), "배수재가 설치된 연약지반의 압밀해석과 역해석 기법의 적용", 공학박사 학위논문, 한국과학기술원, pp.1-169.
- 김형주, 원명수 (1997), "수평배수공법에 의해 개량된 준서점토지반의 압밀거동에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제13권, 제1호, pp.137-146.
- 윤찬영, 이상인, 백승경, 정충기 (2007), "점증하중 재하 지반의 계층기반 침하 예측 방법의 개발" 대한토목학회 논문집, 제27권, 제 6C호, pp.425-432.
- 백승경 (2007), 점증하중 재하 시 계층 자료를 이용한 침하 예측방법, 석사학위 논문, 서울대학교, p.16.
- 천성호, 김한샘, 윤찬영, 정충기 (2011), "성토고 변화를 고려한 새로운 연약 지반 침하 예측 기법", 대한토목학회논문집 제31권 제5C호, pp.155-162
- 임성욱 (2007), "계층관리를 통한 연약지반의 장래침하량 예측방법대심도 연약지반에서의 지반개량도 분석에 대한 연구" 한양대학교 공과대학원 석사학위논문
- 추윤식, 김준현, 황세환, 정충기 (2010), "쌍곡선법을 이용한 계층 기반 연약지반 침하 거동 예측의 최적화 방안", 한국지반공학회논문집, Vol.26 No.7, pp.147-159
- 최호광, 이대명, 백승훈, 정성교 (1997), "새로운 침하예측기법 및 적용", 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp.37-47.

- Asaoka, A. (1978), "Observational procedure of settlement prediction," *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol. 18, No. 4, pp.87-101.
- Atkinson, M.S. and Eldred, P.J.L. (1981), "Consolidation of soil using vertical drains." *Geotechnique*, Vol.31, No.1, pp.33-43.
- Balasubramaniam, A. S., Phien-wej, N., Indraratna, B. and Bergado, D. T. (1989), "Predicted behaviour of a test embankment on a Malaysian marine clay", *Int. Symp. on Trial Embankments on Malaysian Clays*, Kuala Lumpur, Malaysia, Vol.2, pp.1-8.
- Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drains wells." *Trans., ASCE*, Vol.113, Paper No.2346.
- Bellezza, I. And Fentini, R. (2008), "Prefabricated vertical drains: a simplified design procedure." *Journal of Ground Improvement*, Vol.161, pp.173-178.
- Bergado, D.T., Enriquez, A.S., Sampaco, C.L., Alfaro, M.C., Balasubramaniam, A.S., (1992), "Inversed analysis of geotechnical parameters on improved soft Bangkok clay." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE 118 (7), pp.1012-1030.
- Bergado, D.T., Long, P.V., and Balasubramaniam, A.S. (1996), "Compressibility and flow parameters from PVD improved soft Bangkok clay." *Geotechnical Engineering Journal*, Vol.27, No.2, pp.1-20.
- Bergado, D.T., Mukherjee, K., Alfaro, M.C. and Balasubramaniam, A.S. (1993), "Prediction of vertical-band-drain performance by the finite-element method." *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.12, No.6, pp.567-586.
- Berry, P. L. and Wilkinson, W. B. (1969), "The Radial Consolidation of Clay Soils", *Geotechnique*, Vol.19, No.2, pp.253-284.
- Bo, M.W. (2004), "Discharge capacity of prefabricated vertical drain and their field measurements." *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.22, No.1-2, pp.37-48.
- Bo, M.W., Chu, J. Low, B.K. and Choa, V. (2003), *Soil improvement:*

- Prefabricated vertical drain techniques. Thomson, Singapore, 341p.
- Das, B.M. (1993), "Principles of Geotechnical Engineering", 3rd Edition, PWS Publishing Company, pp.253-315.
- Chai, J.C. and Miura, N. (1999), "Investigation of factors affecting vertical drain behavior." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.125, No.3, pp.216-226.
- Choa, V. (1995), "Changi east reclamation project." Int'l Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima '95, Balkema, pp.185-199.
- Chung, S.G., Baek, S.H., Kim, G.J., and Lee, D.M. (1999), "Field monitoring and prediction of consolidation settlement occurred by preloading in the Nakdong river delta." Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.15, No.5, pp.99-110(in Korean).
- Ghadeharioon, A., Indraratna, B., and Rujikiatkamjorn, C. (2010), "Analysis of soil disturbance associated with mandrel-driven prefabricated vertical drains using an elliptical cavity expansion theory." Int. J. Geomech., ASCE, Vol.10, No.2, pp.53-64.
- Hansbo, S. (1979), "Consolidation of clay by band shaped prefabricated drains." Ground Engineering, Vol.12, No.5, pp.16-25.
- Hansbo, S. (1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", Proc. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol.3, pp.677-682.
- Hird, C.C. and Moseley, V.J. (2000), "Model study of seepage in smear zones around vertical drains in layered soil." Geotechnique, Vol.50, No.1, pp.89-97.
- Hoshino, K. (1962), "Problems of foundation s in recent years", Transactions of Japan Society of Civil Engineers, Vol.47, No.7, pp.63-67(in Japanese).

- Indraratna, B. and Bamunawita, C.I. (2002), "Soft clay stabilization by mandrel driven geosynthetic vertical drains." Proc., ISSMGE-TC36 Workshop, Mexico City, pp.57-86.
- Lambe, W. and Whitman, R. V. (1969), Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., pp.451.
- Lee, N.K. and Chung, S.G. (2010), "Reevaluation of the factors influencing the consolidation of ground by incorporating prefabricated vertical drains.", KSCE J. Civ. Eng. Vol.14, No.2, pp.155-164.
- Lerouil, S., Magnan, J. P. and Tavenas, F. (1990), "Embankment on Soft Clays", Ellis Horwood, p.360.
- Li, A.L. and Rowe, R.K. (2001), "Combined effects of reinforcement and prefabricated vertical drains on embankment performance." Canadian Geotechnical Journal, Vol.38, No.6, pp.1266-1282.
- Lo, D.O.K. (1991), Soil Improvement by Vertical drains. PhD. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, pp.190-231.
- Mesri, G. and Choi, Y. K. (1985), "Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays." ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division. Vol.111, No.4, April, pp.441-464.
- Mesri, G. and Lo, D.O.K. (1991), "Field performance of prefabricated vertical drains." Proceedings of the International Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development Theory and Practice on Soft Ground, Geo-Coast '91, Yokohama, Japan, Vol.1, Yokohama, pp.231-236.
- Mikasa, M. (1965), "The consolidation of soft clay - a new consolidation theory and its application.", Tokyo: Japan Society of Civil Engineering (1965), pp.21-26.
- Olson, R.E. (1998), 31th Terzaghi Lecture: "Settlement of embankments on soft clays." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,

ASCE, Vol.124, No.4, pp.278-296.

Onoue, A. (1988), "Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration", Soils and Foundations, Vol.28, No.4, pp.165-174.

Onoue, A., Ting, N., Germaine, J.T. and Whitman, R.V. (1991). "Permeability of disturbed zone and around vertical drains." Geotechnical Special Publication, 27, American Society of Civil Engineers, New York, pp.879-890.

Sivaram, B., and Swamee, A.(1977), "A Computational Method for Consolidation Coefficient,"Soils and Foundations, Vol.17, No.2, pp.48-52.

Sridharan A. and S. Rao (1981). "Rectangular hyperbola fitting method for one-dimensional consolidation. GTJ, ASTM, Vol.4, No.4, pp.161-168.

Stark, T.D., Williamson, T., Fowler, J., Pezza, D. and Gibbons, Y. (1999), "Prefabricated vertical-drain test section in Craney island dredged material management area." Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol.13, No.1, pp.8-16.

Tan, S.A.(1993),"Ultimate Settlement by Hyperbolic Plots for Clays with Vertical Drains, "Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.119, No. 5, pp.950-956.

Tan, S.A.(1994), "Hyperbolic method for settlements in clays with vertical drains, "Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, pp.125-131.

Tan, S.A. (1995), "Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains." Soils and Foundations, Vol.35, No.1, pp.101-113.

Tan, S.A., and S.H. Chew (1996), Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drains. Soils and Foundations, Vol.36, No.3, pp.31-42.

Tan, T.S., Inoue, T., and Lee, S.L. (1991), "Hyperbolic method for consolidation analysis." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117,

No.11, pp.1723-1737.

Terzaghi, K. (1943), "Theoretical soil mechanics", John Wiley and Sons, pp.265-296.

Tripathi, K.K. and Nagesha, M.S. (2010), "Discharge capacity requirement of prefabricated vertical drains." *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.28, No.1, pp.128-132.

Tsyrovish, N. A., Ter-Martirosyan, Z. G. and Kulkarni, K. R. (1971), "Certain problems in consolidation of clayey soils by vertical and horizontal drainage under conditions of equal deformation", *Proc. 4th Asian Regional Conference on Soil Mechanics*.

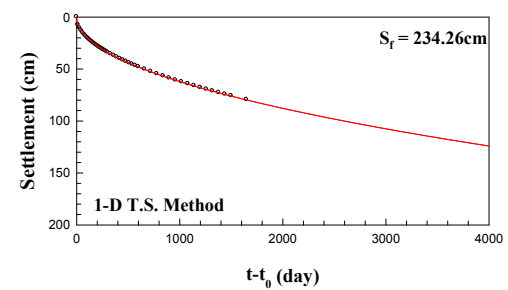
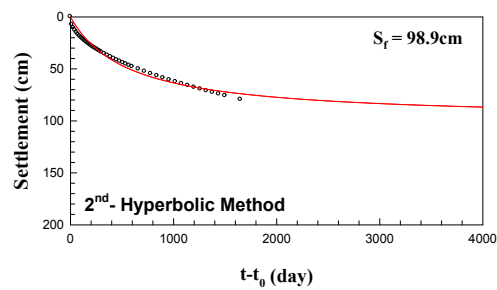
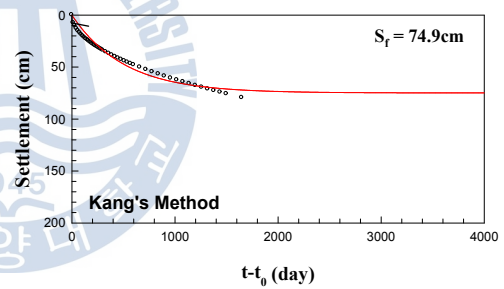
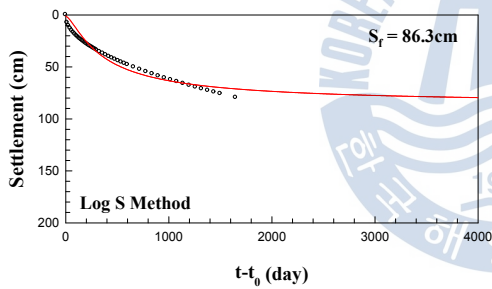
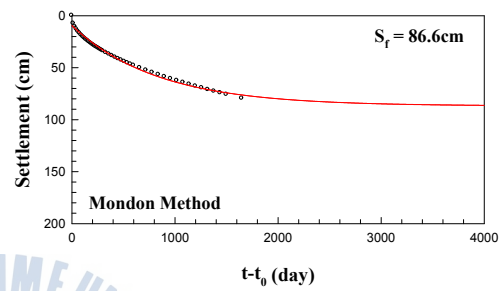
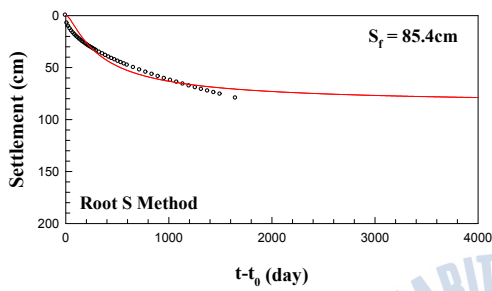
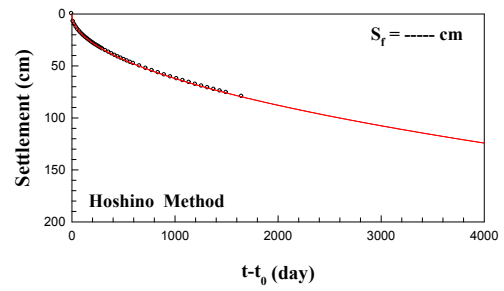
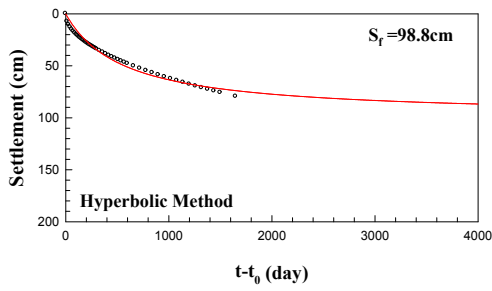
Yoshikuni, H. (1979), "Design and construction control of vertical drain methods", *Gihodo, Tokyo, Foundation Engineering Series, Dissertation, Hiroshima University*(in Japanese).

Yoshikuni, H. and Inoue, T., Sumioka, N., and Hara, H. (1981), "On the characteristics of settlement prediction methods by monitoring." *Tsuchi to Kiso, Tokyo, Japan*, Vol. 29, No. 8, pp.7-13. (in Japanese)

Yoshikuni, H. and Nakanodo, H. (1974), "Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability", *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, pp.35-46.

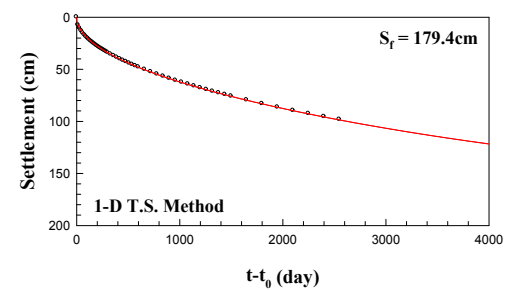
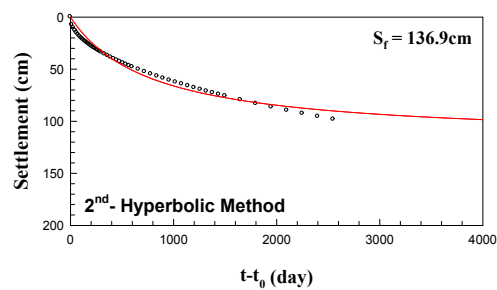
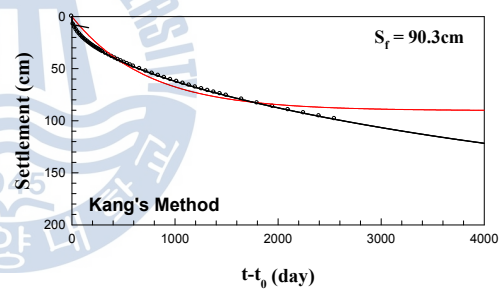
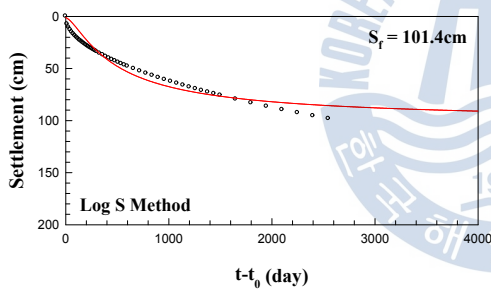
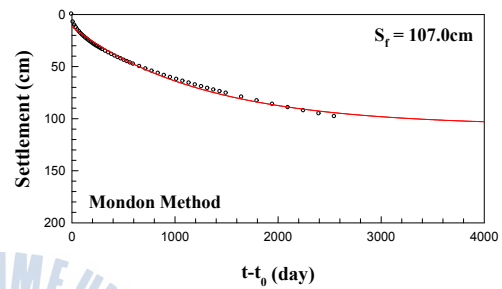
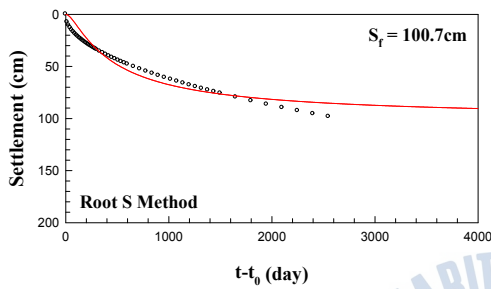
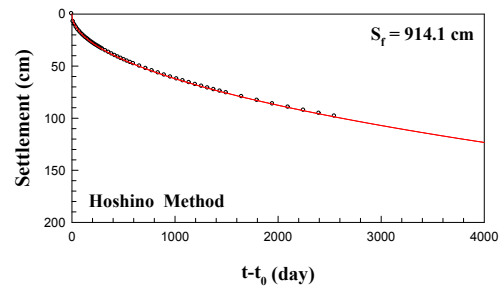
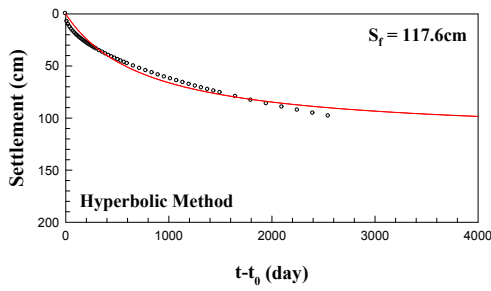
부 록

부록 A	Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	126
부록 B	Results of analysis predicted by three methods of 1-D Theory Simulation method using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	133
부록 C	Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the settlement layer(H) using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	140
부록 D	Results of the settlements predicted by 1-D Theory Simulation method according to variation of the initial void ratio(e_0) using the settlement curve proposed by Terzaghi's theory	147
부록 E	Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the horizontal drainage theory	154
부록 F	Comparison of the final settlements predicted by each method using the settlement curve proposed by the finite element method	161
부록 G	Comparison of the final settlements predicted by each method(Hwajeon site)	168
부록 H	Time - settlement curve by staged filling (Hwajeon site)	199
부록 I	Comparison of the final settlements predicted by each method(Meeum site)	215
부록 J	Time - settlement curve by staged filling (Meeum site)	225



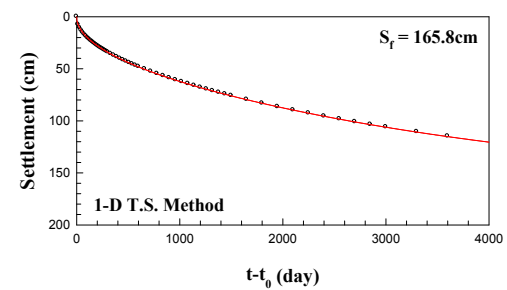
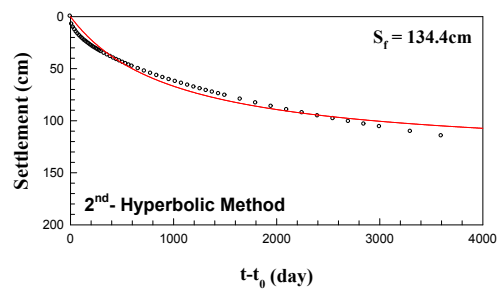
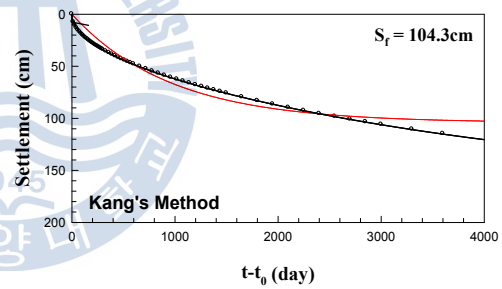
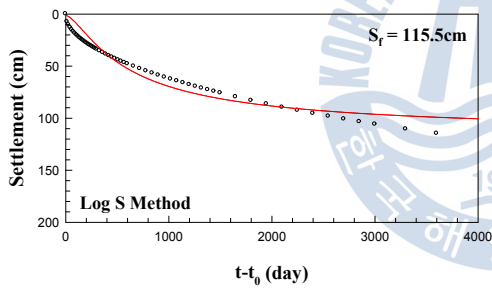
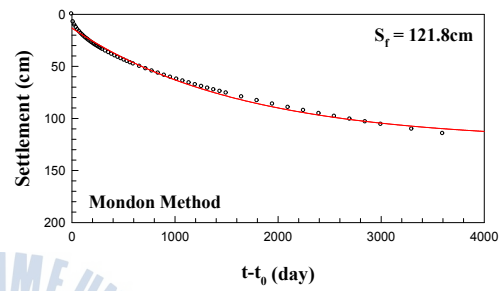
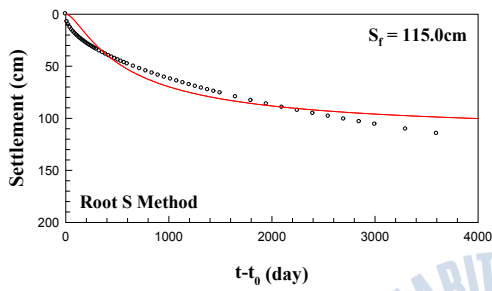
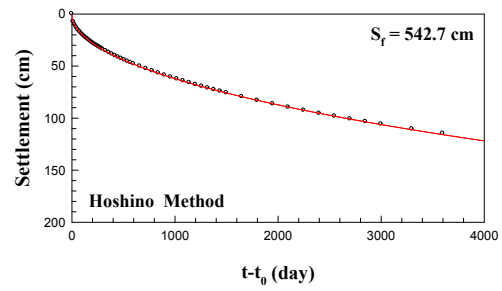
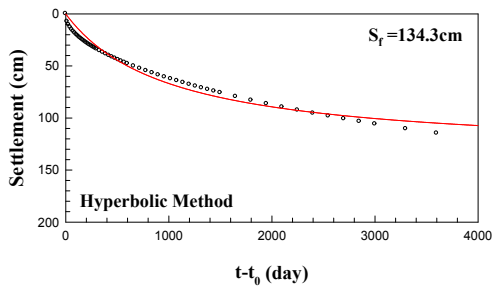
Terzaghi 1-D Theory ($U < 50\%$)

부록 A



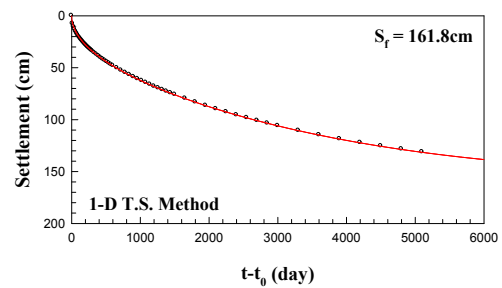
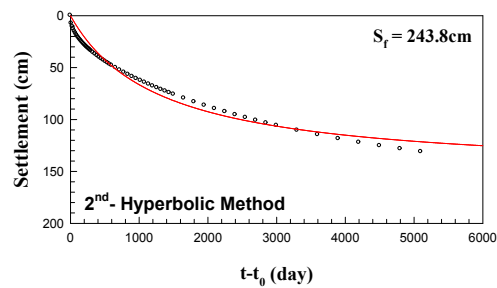
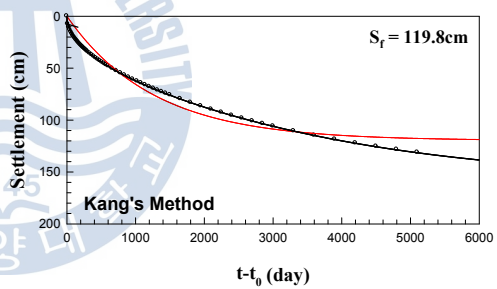
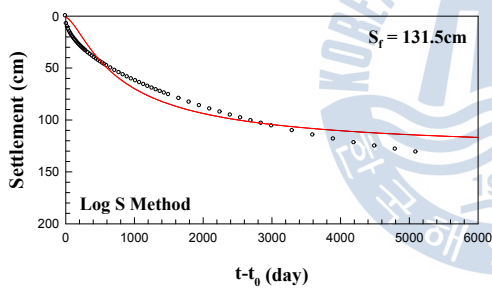
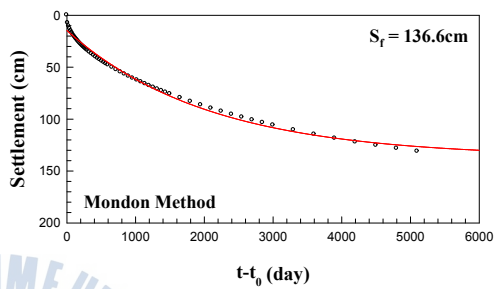
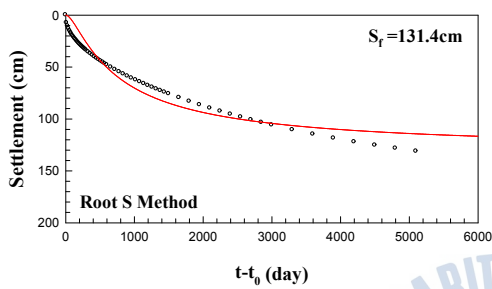
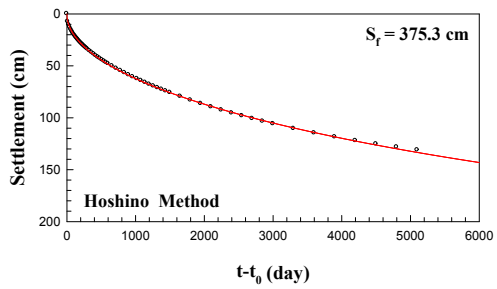
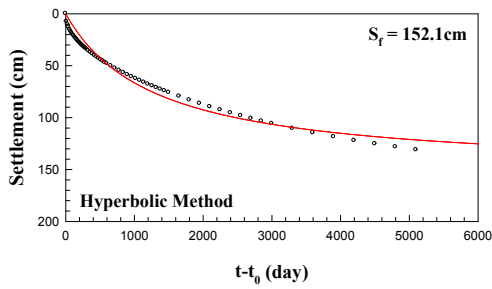
Terzaghi 1-D Theory ($U < 60\%$)

부록 A (continued)



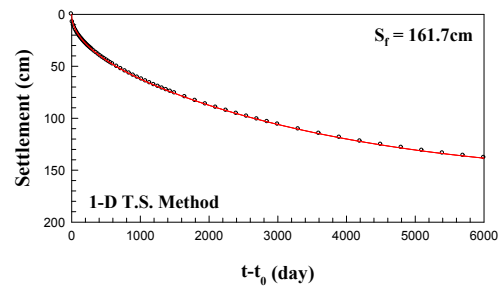
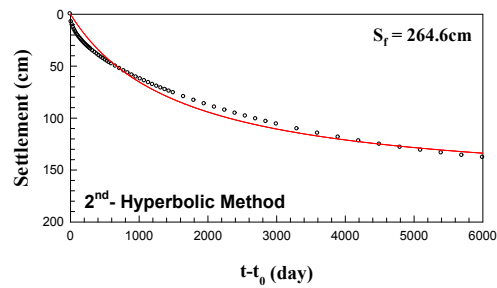
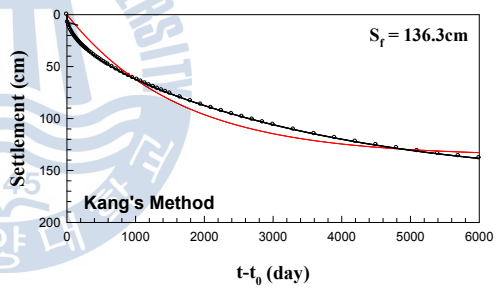
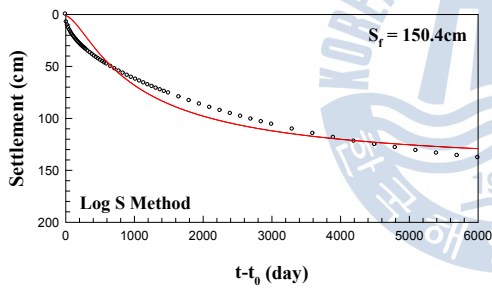
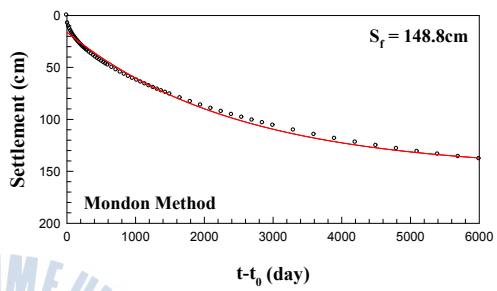
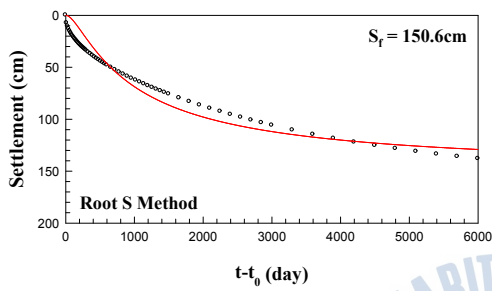
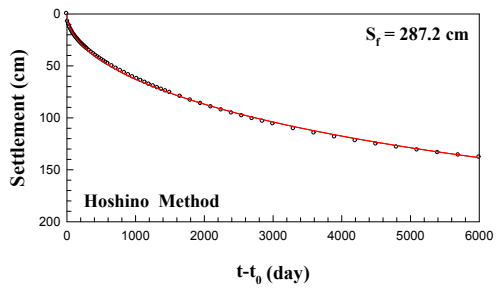
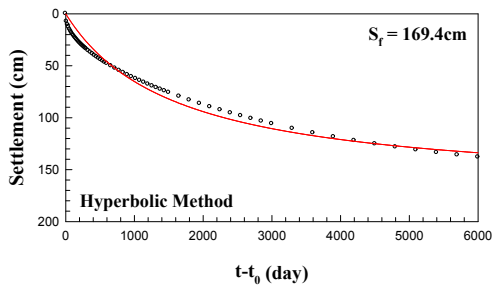
Terzaghi 1-D Theory ($U < 70\%$)

부록 A (continued)



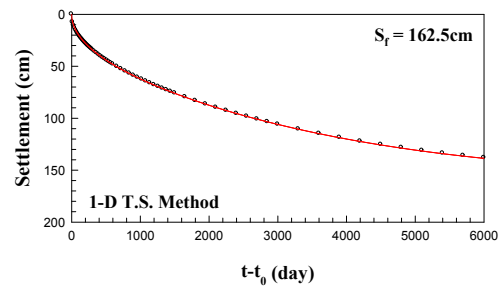
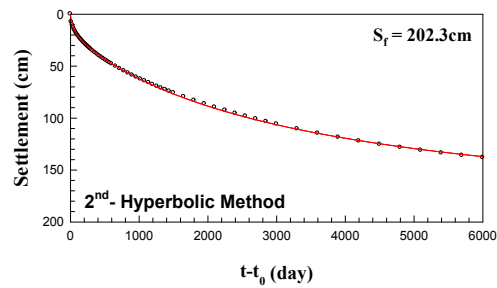
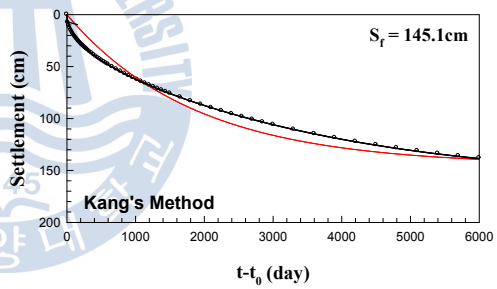
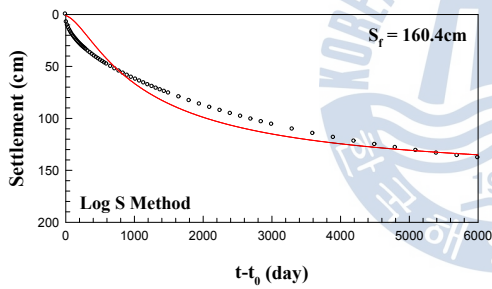
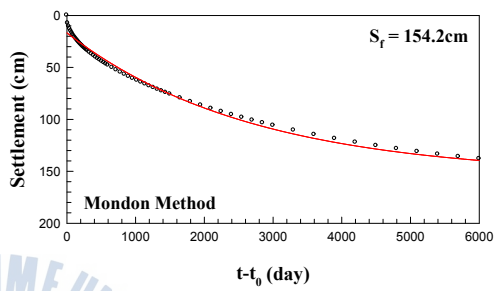
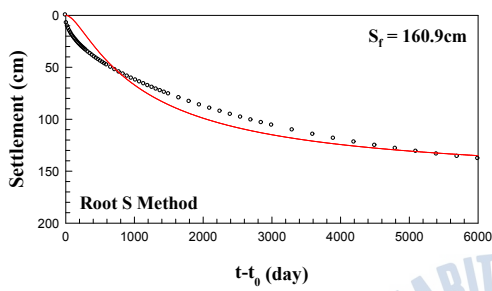
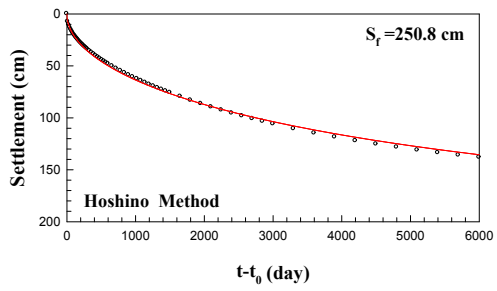
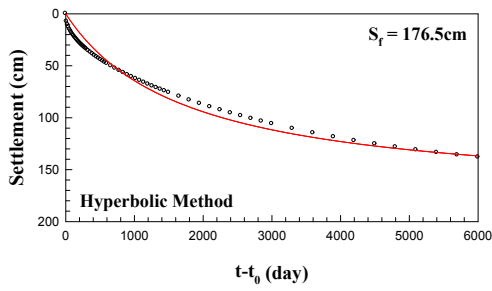
Terzaghi 1-D Theory ($U < 80\%$)

부록 A (continued)



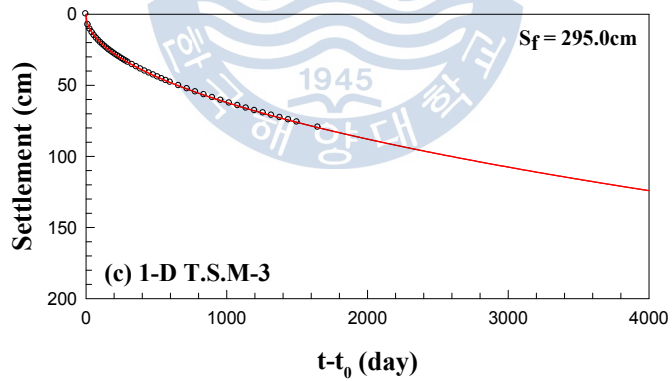
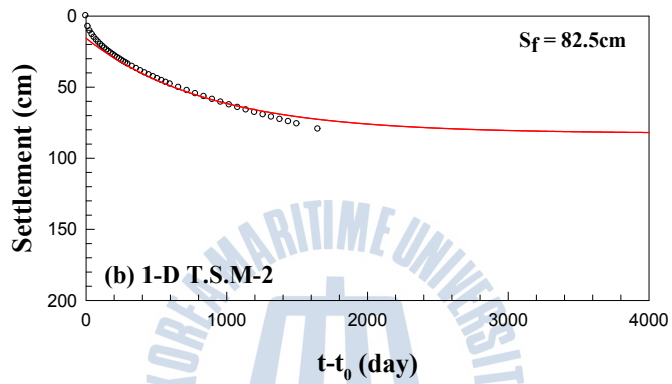
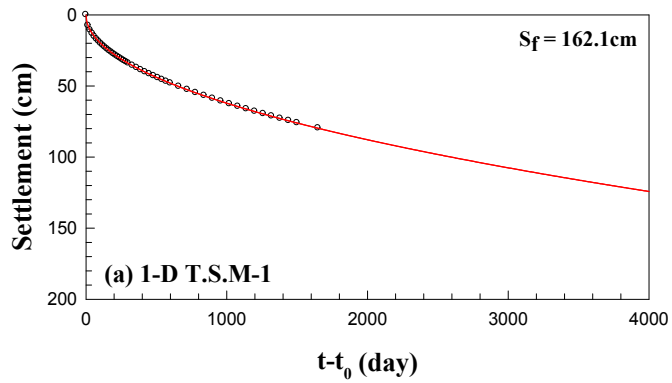
Terzaghi 1-D Theory ($U < 90\%$)

부록 A (continued)



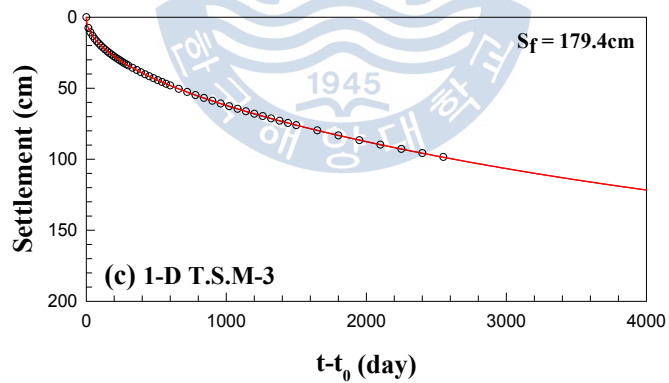
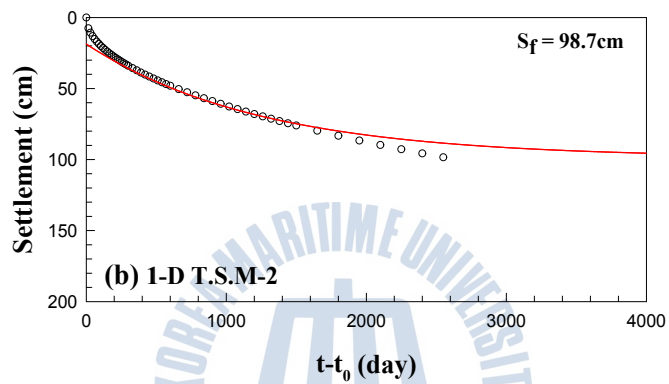
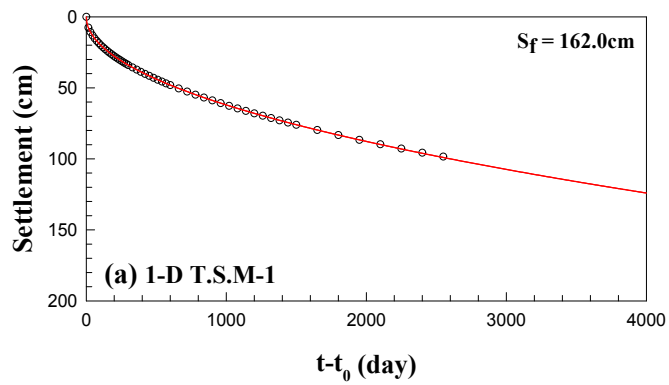
Terzaghi 1-D Theory ($U < 95\%$)

부록 A (continued)



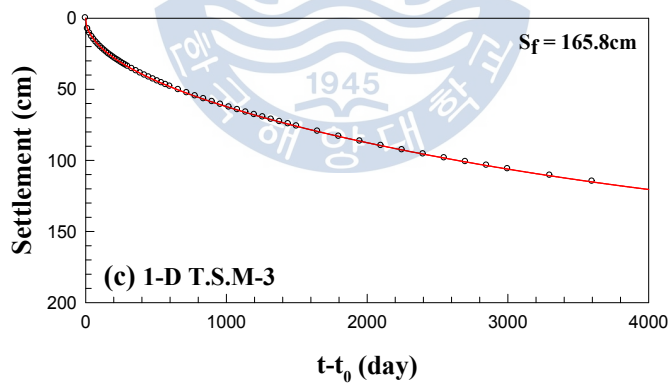
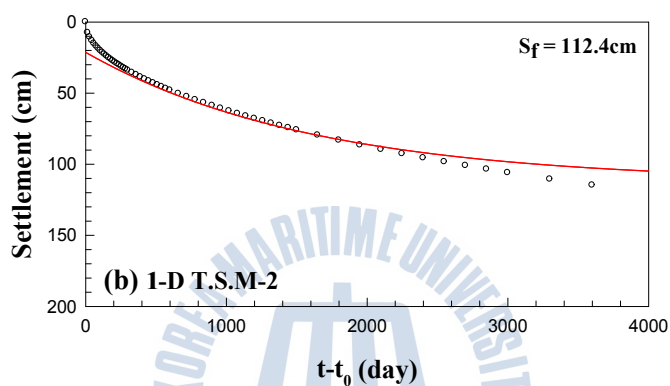
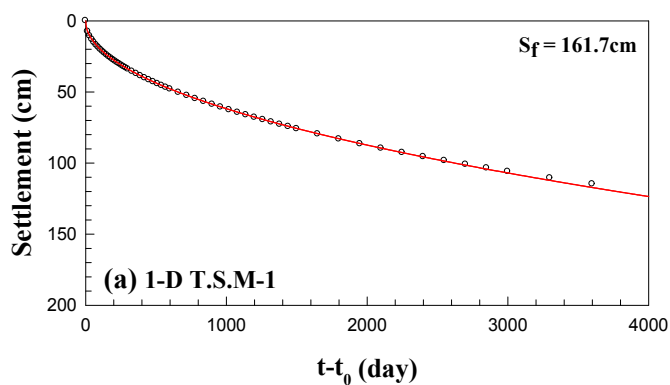
Terzaghi 1D ($U < 50\%$)

부록 B



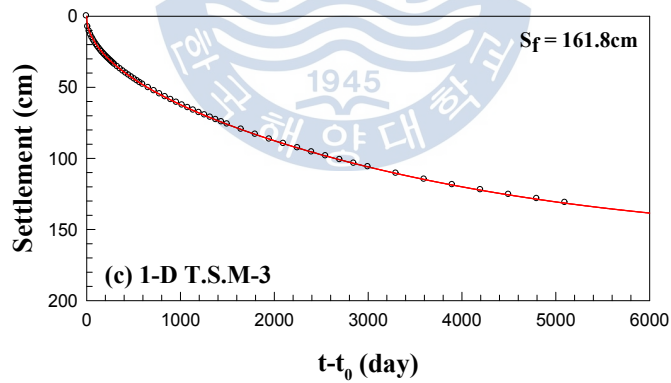
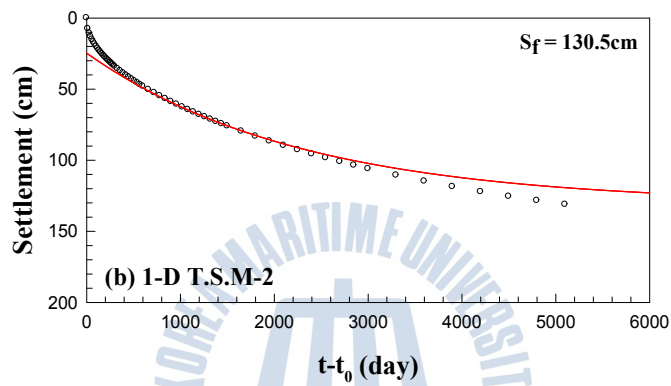
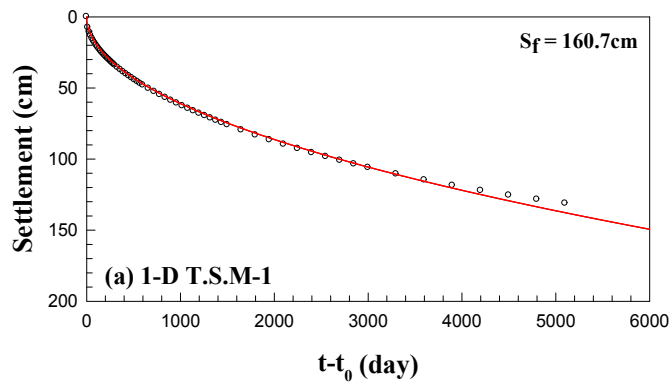
Terzaghi 1D ($U < 60\%$)

부록 B (continued)



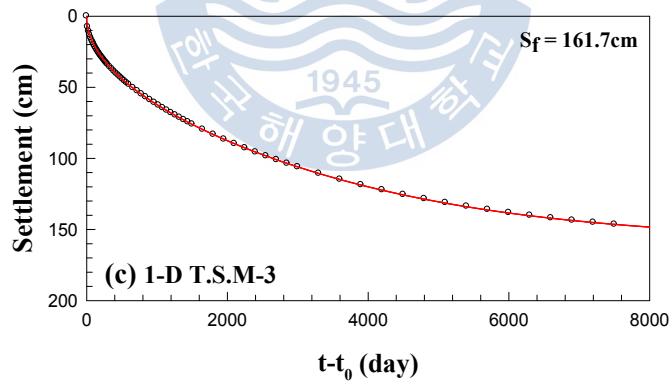
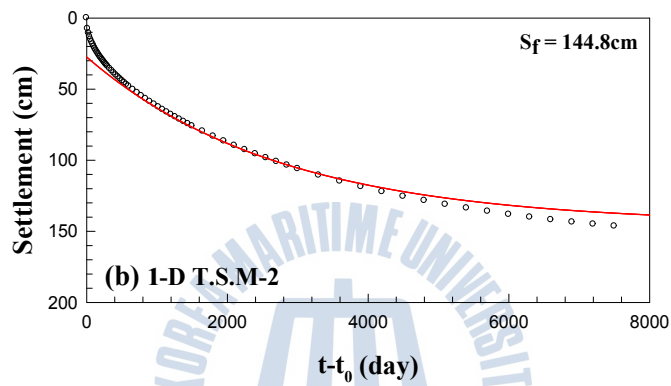
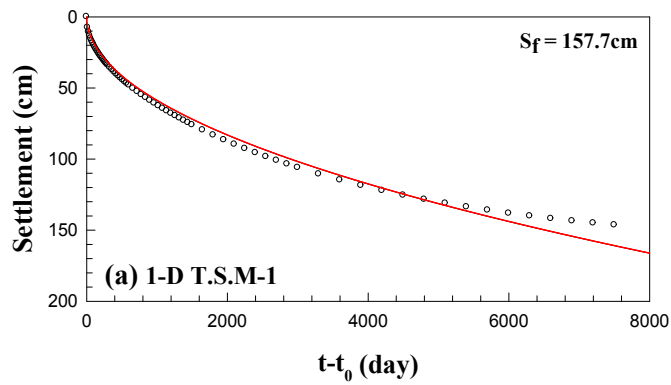
Terzaghi 1D ($U < 70\%$)

부록 B (continued)



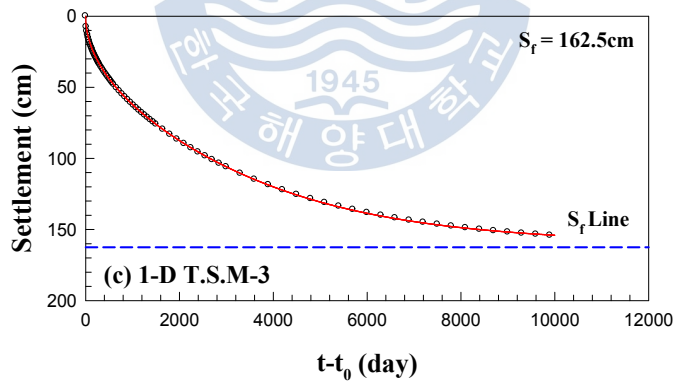
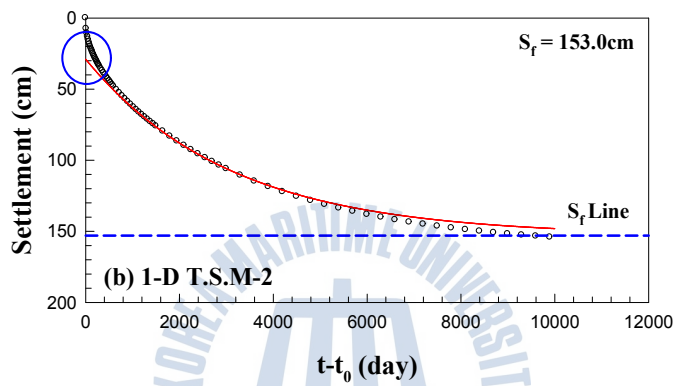
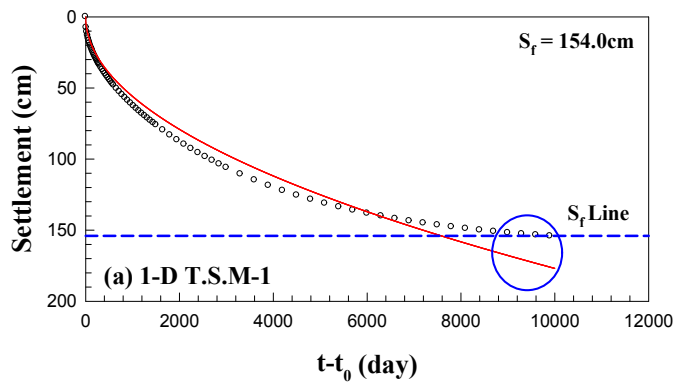
Terzaghi 1D ($U < 80\%$)

부록 B (continued)



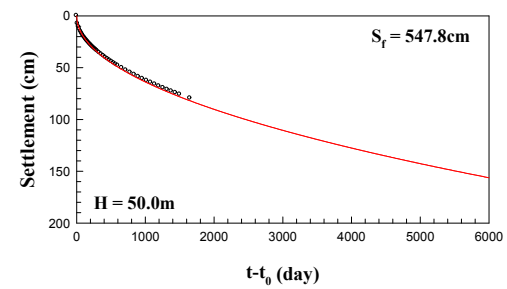
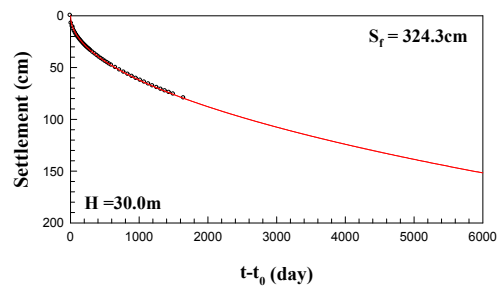
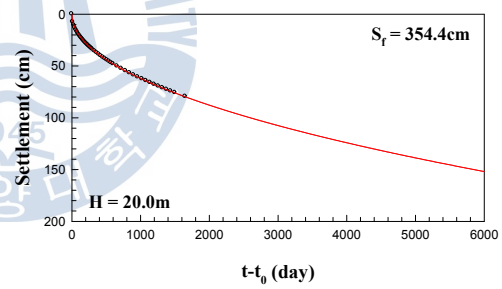
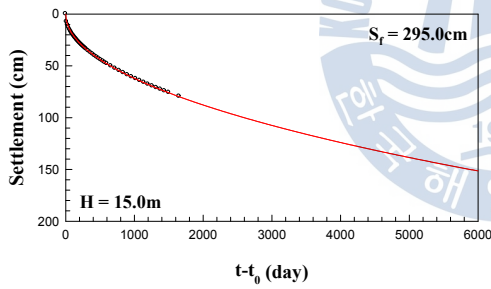
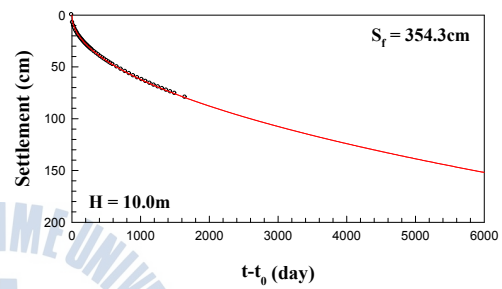
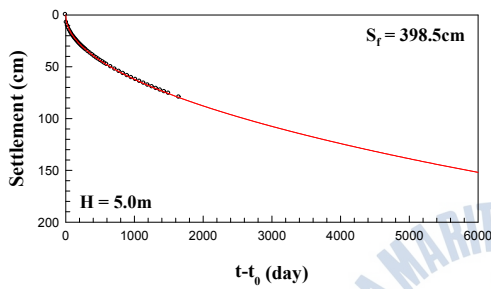
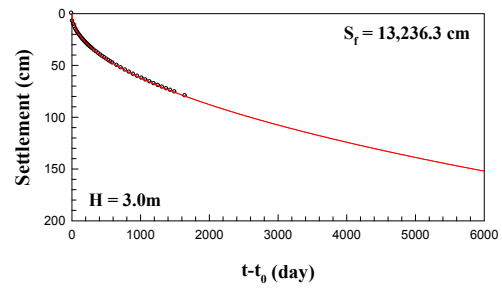
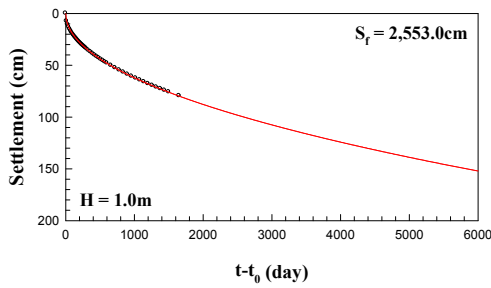
Terzaghi 1D ($U < 90\%$)

부록 B (continued)



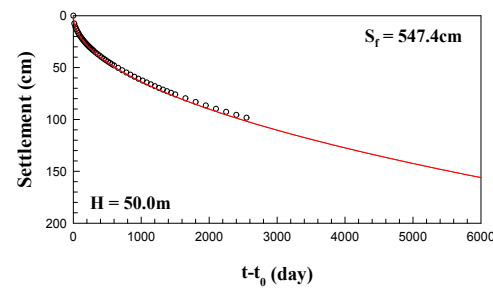
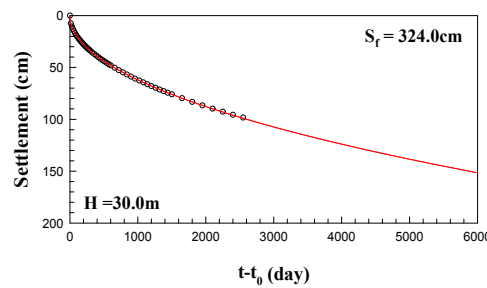
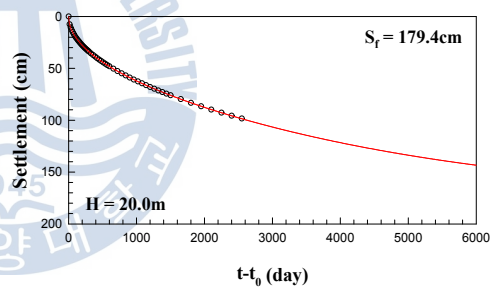
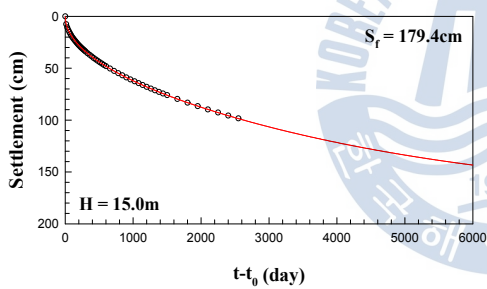
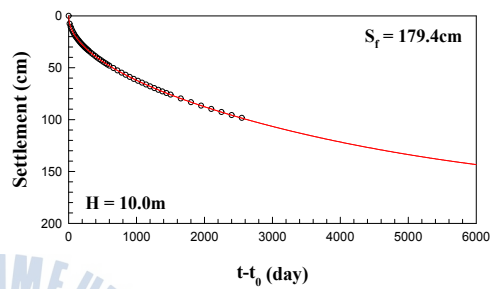
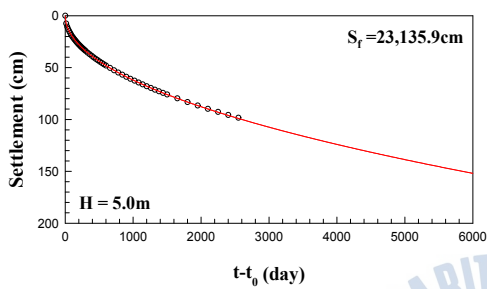
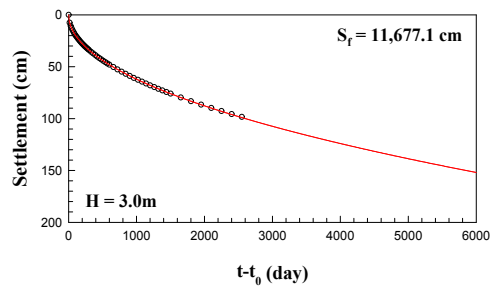
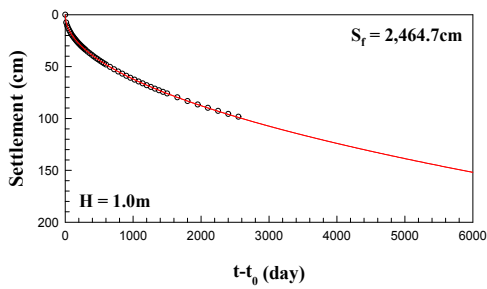
Terzaghi 1D ($U < 95\%$)

부록 B (continued)



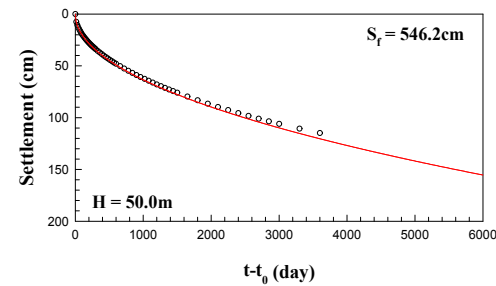
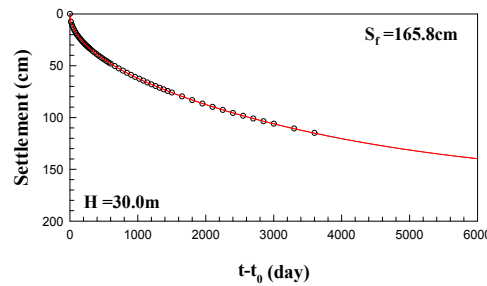
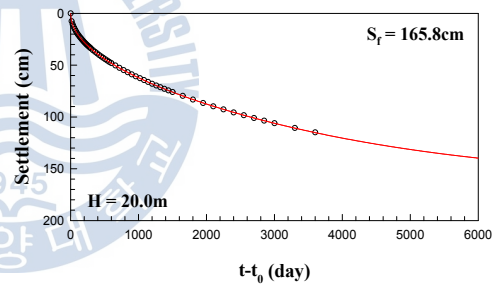
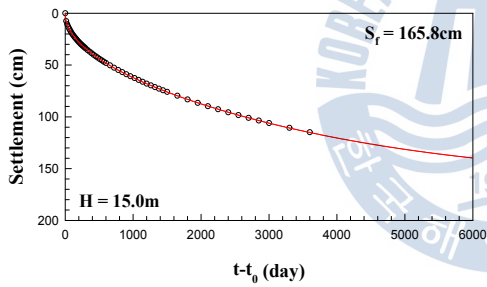
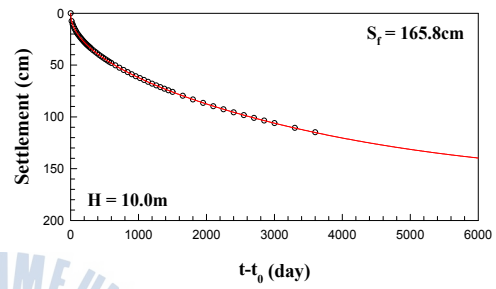
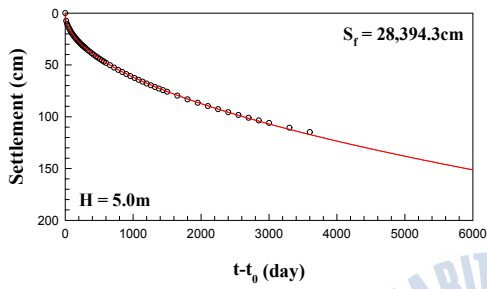
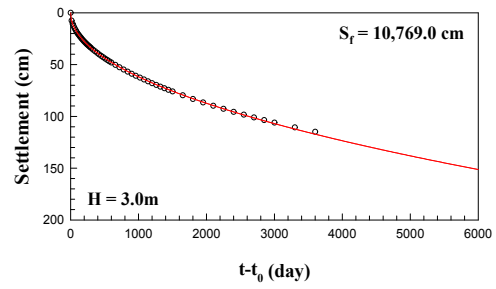
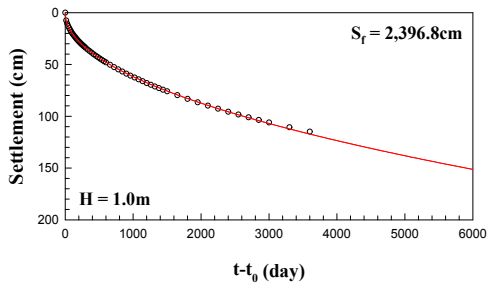
1-D Theory Simulation Method ($U < 50\%$)

부록 C



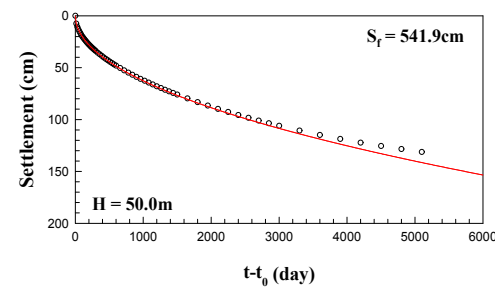
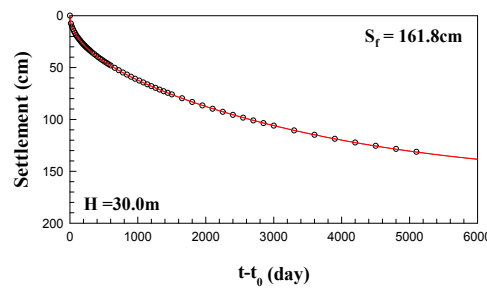
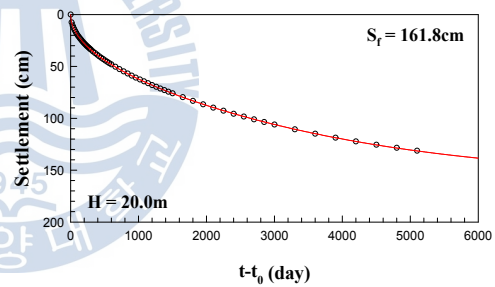
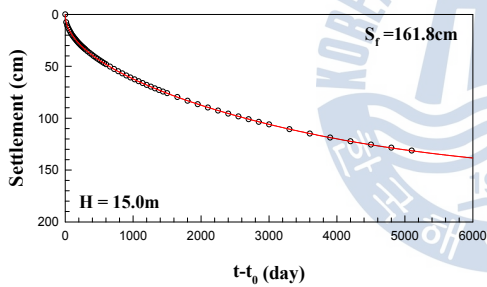
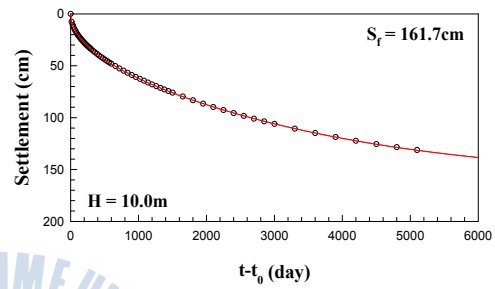
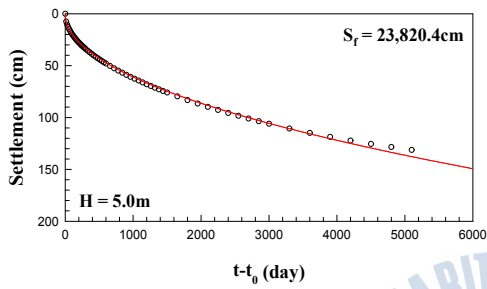
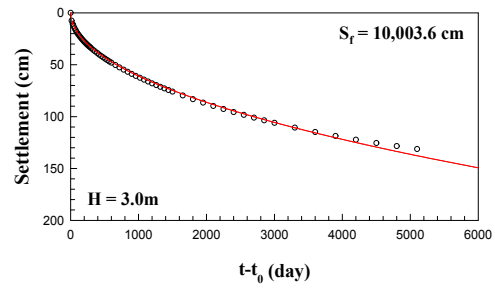
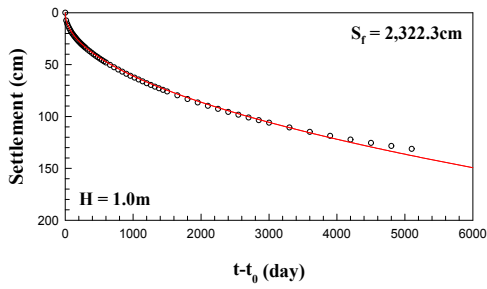
1-D Theory Simulation Method ($U < 60\%$)

부록 C (continued)



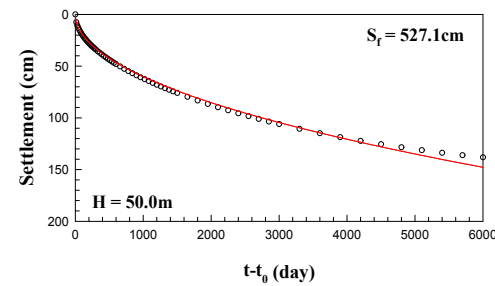
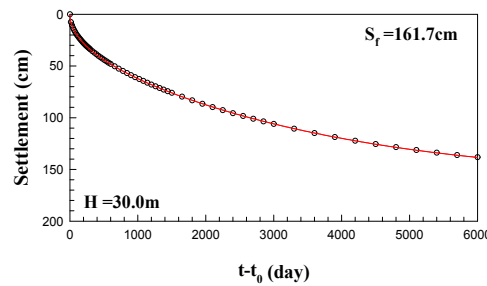
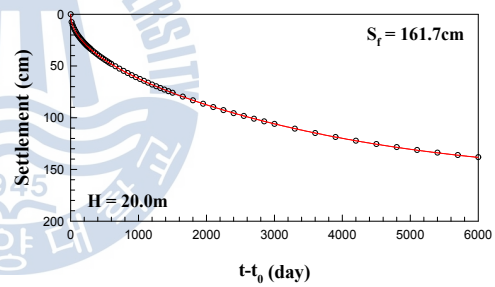
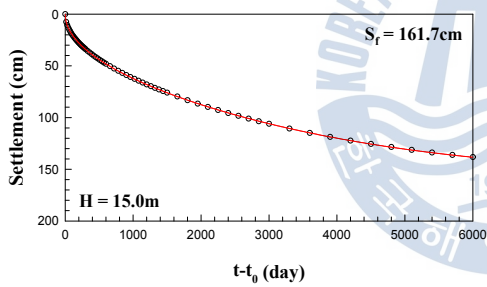
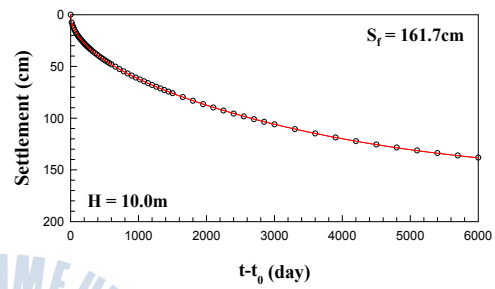
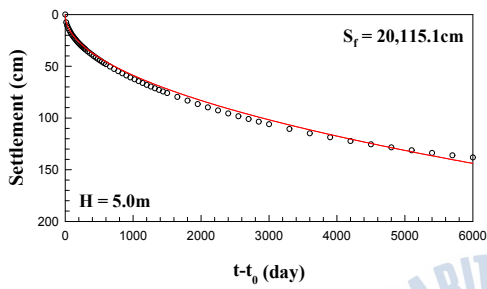
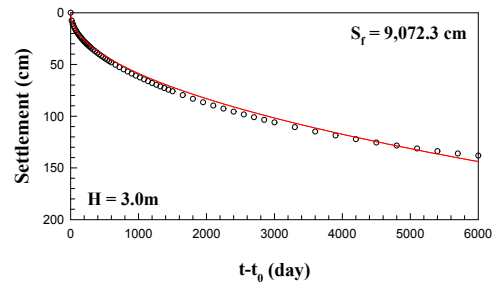
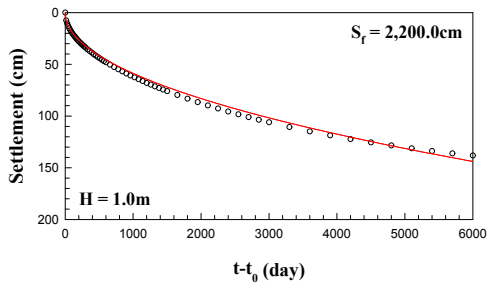
1-D Theory Simulation Method ($U < 70\%$)

부록 C (continued)



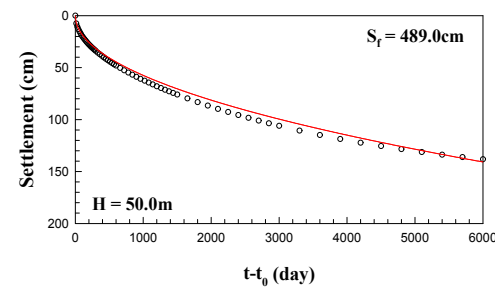
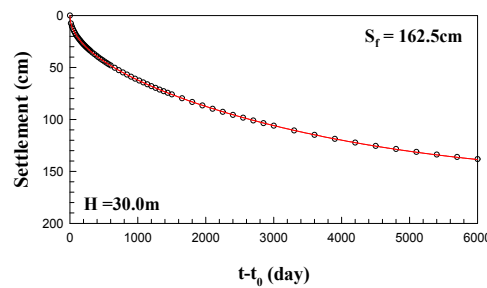
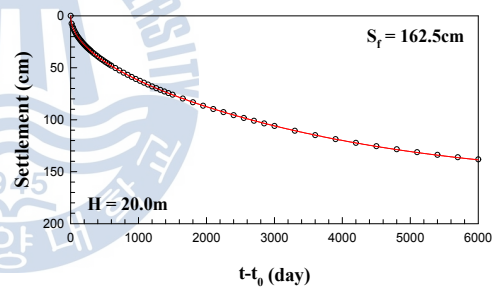
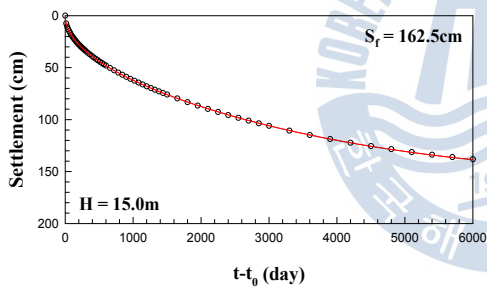
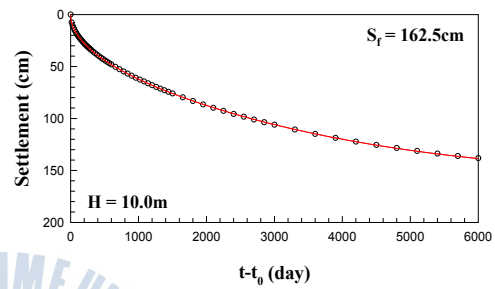
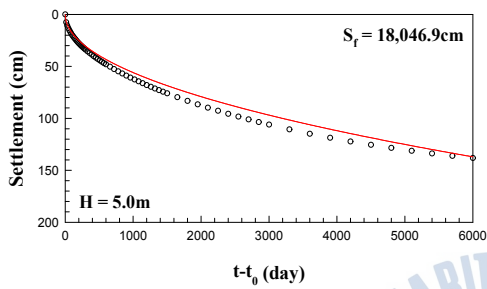
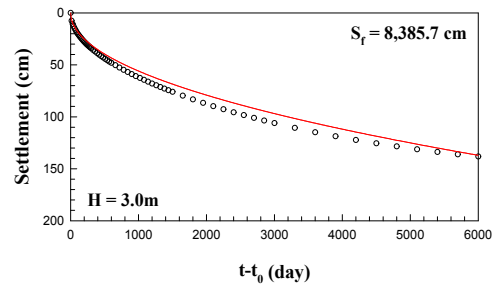
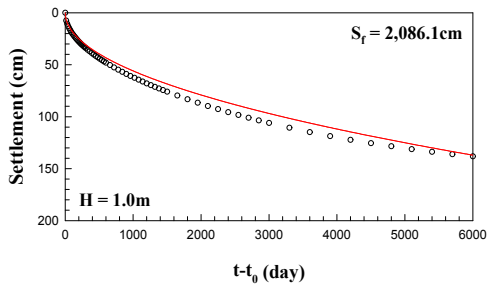
1-D Theory Simulation Method ($U < 80\%$)

부록 C (continued)



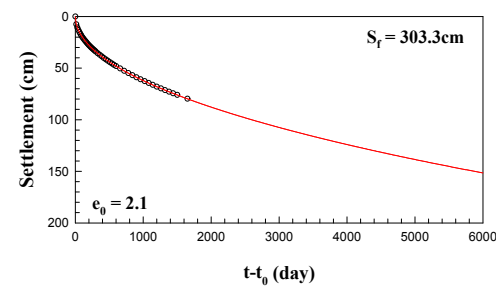
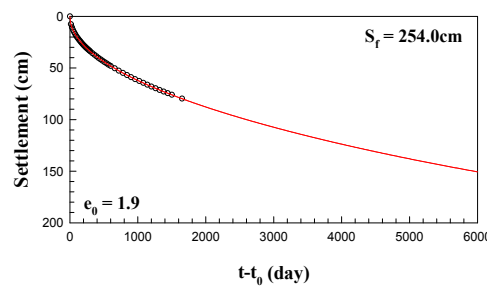
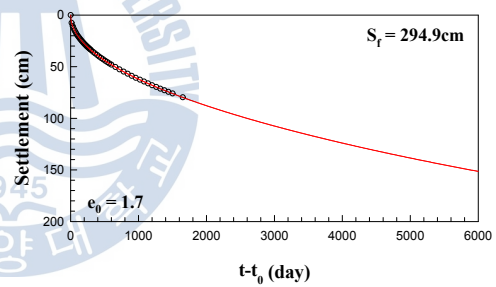
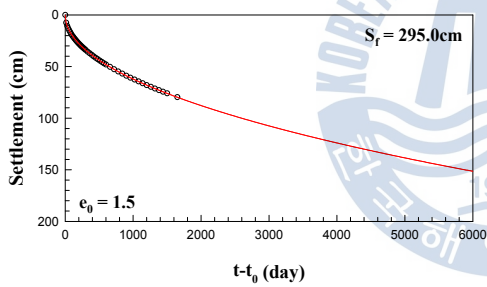
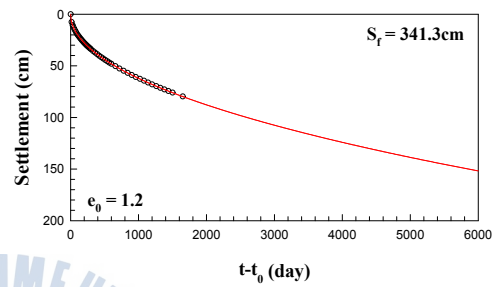
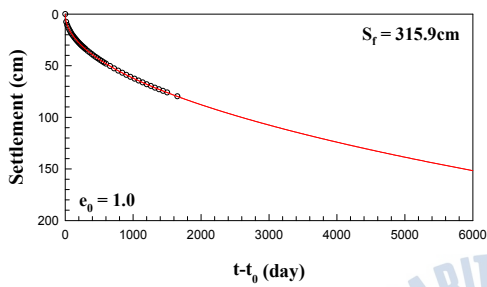
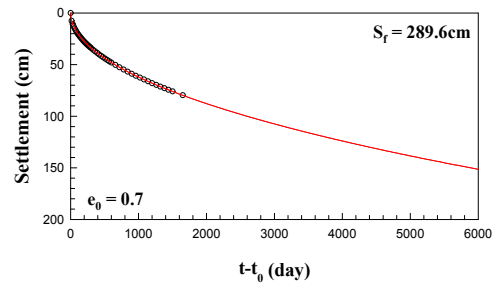
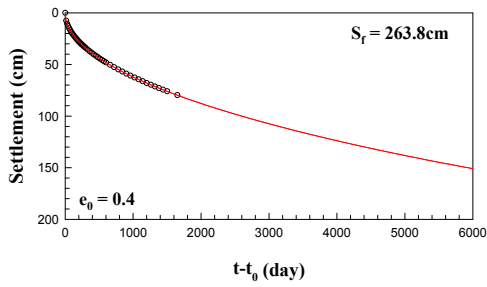
1-D Theory Simulation Method ($U < 90\%$)

부록 C (continued)



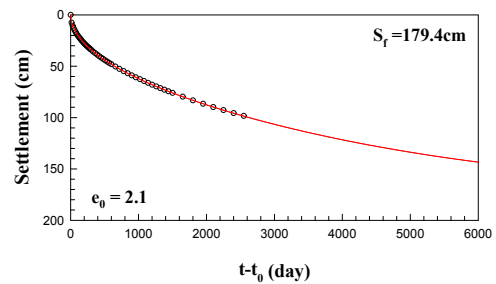
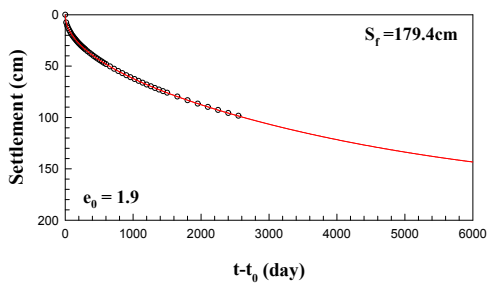
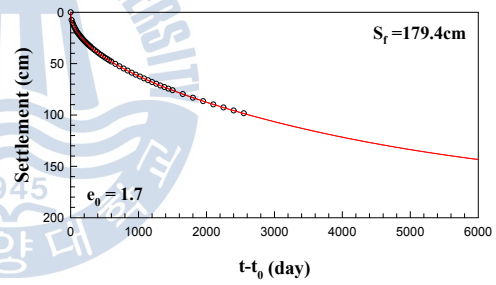
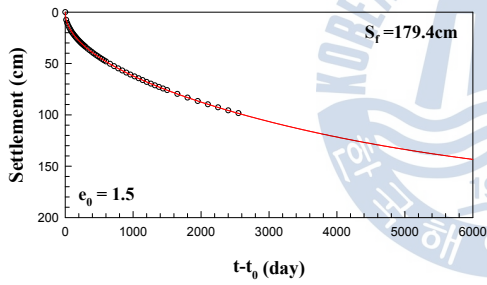
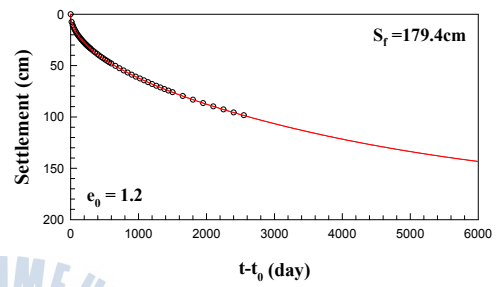
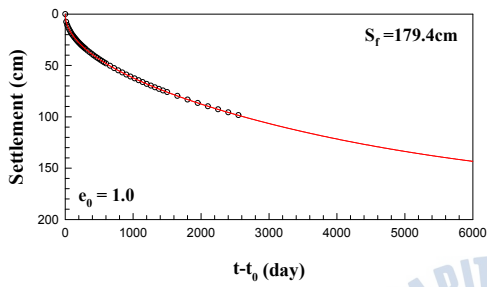
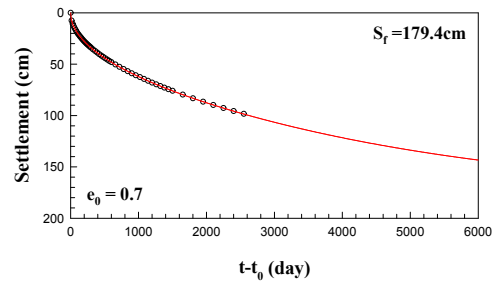
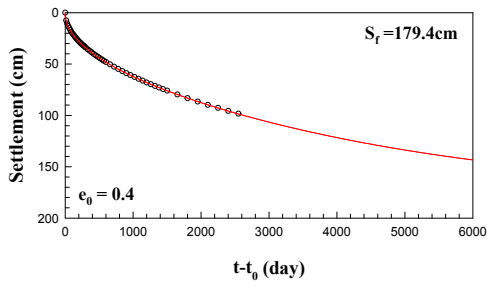
1-D Theory Simulation Method ($U < 95\%$)

부록 C (continued)



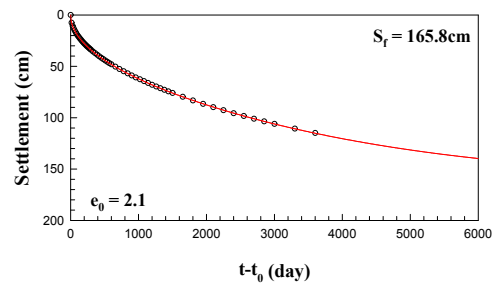
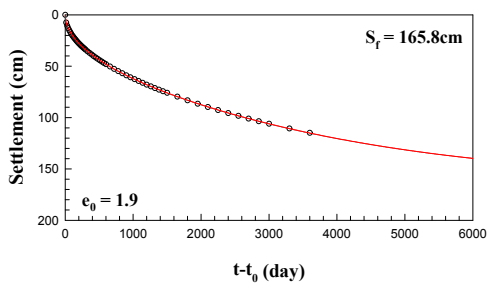
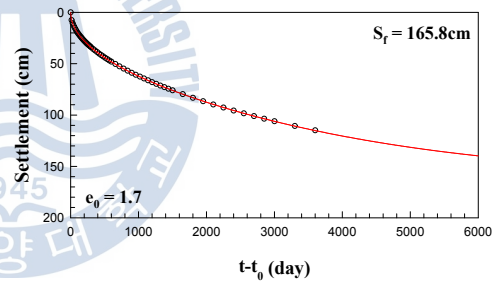
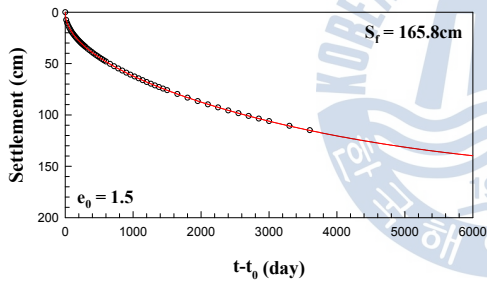
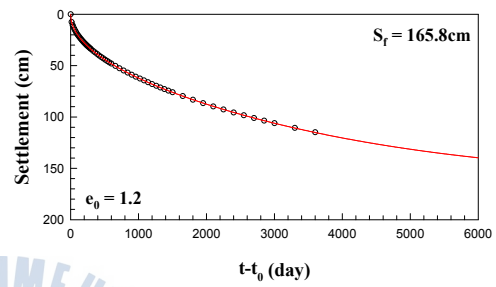
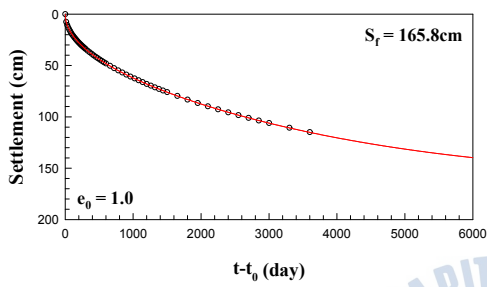
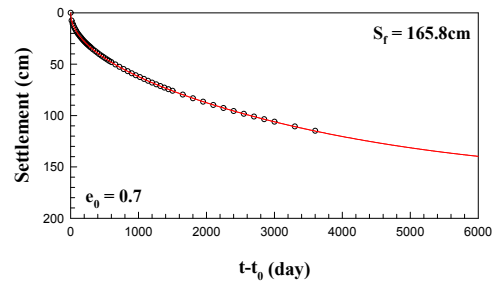
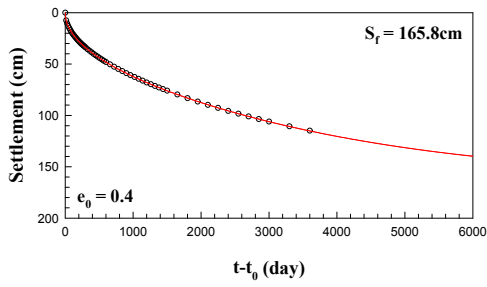
1-D Theory Simulation Method ($U < 50\%$)

부록 D



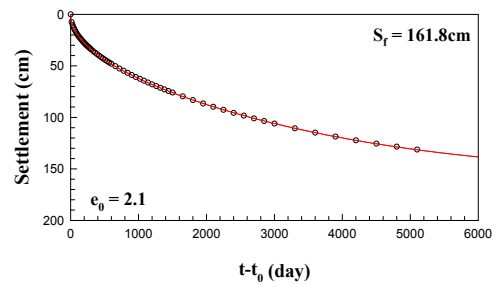
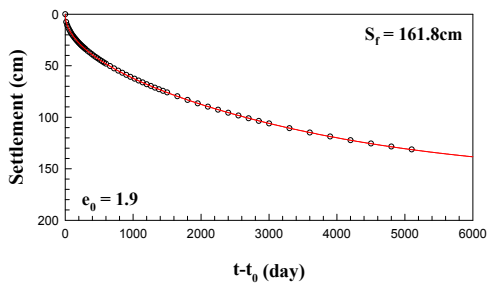
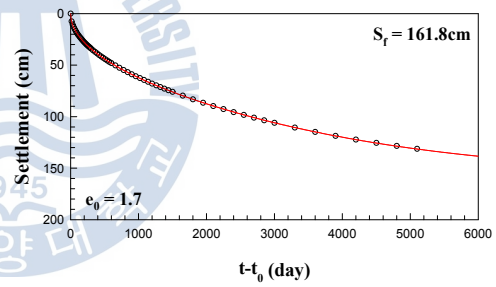
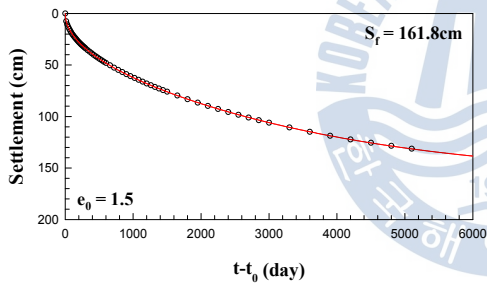
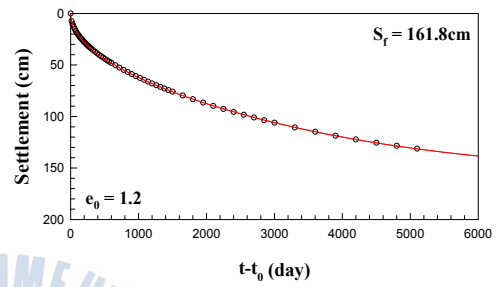
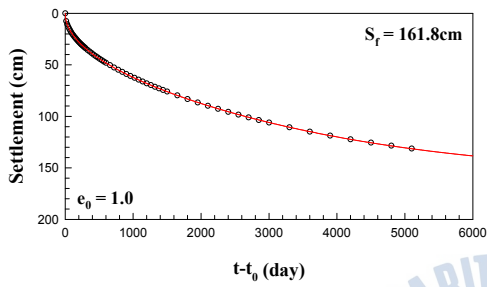
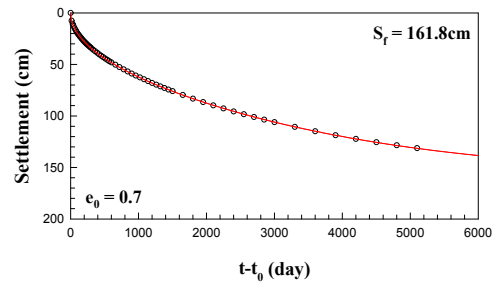
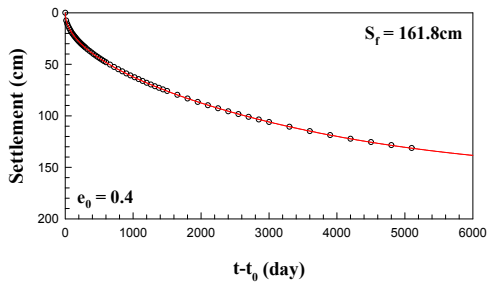
1-D Theory Simulation Method ($U < 60\%$)

부록 D (continued)



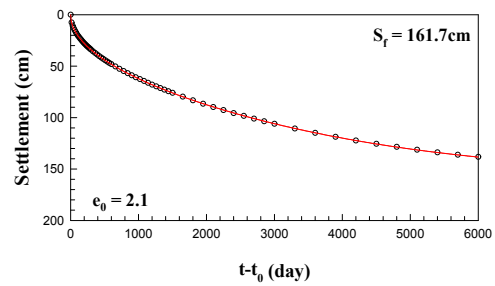
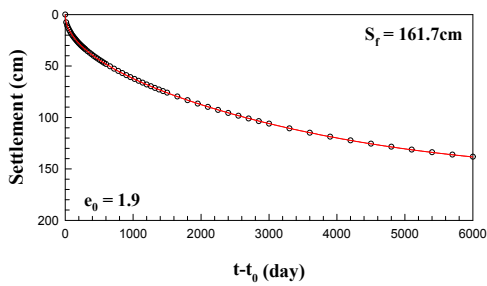
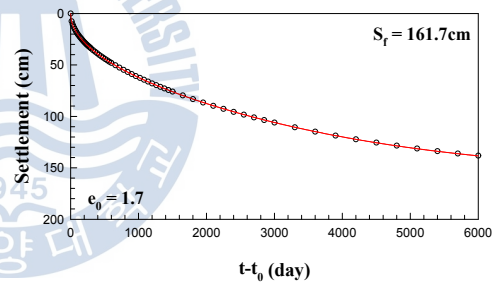
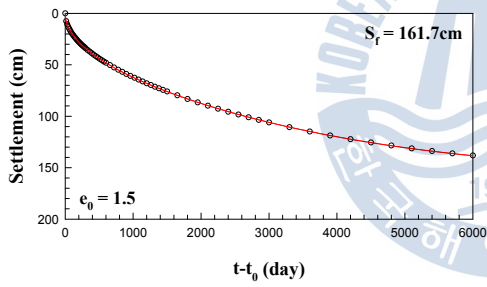
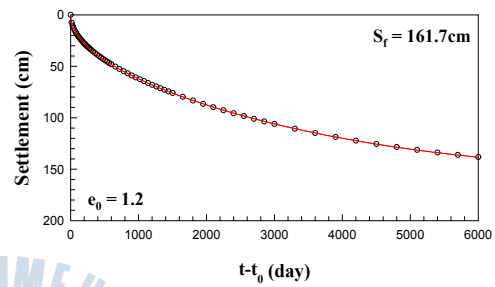
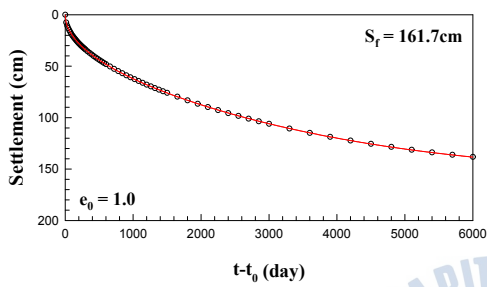
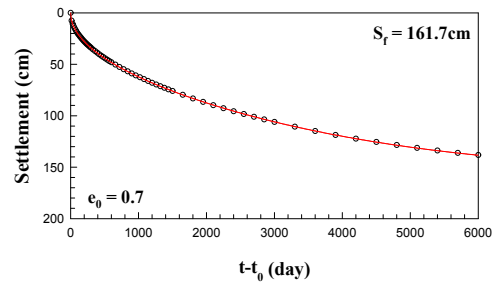
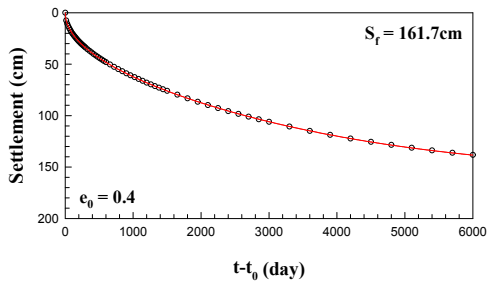
1-D Theory Simulation Method ($U < 70\%$)

부록 D (continued)



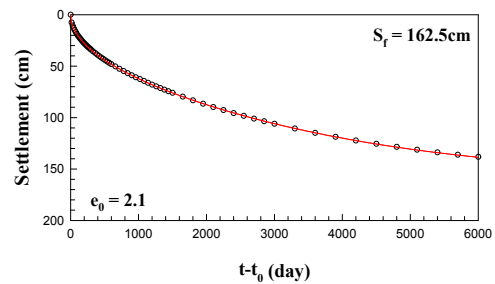
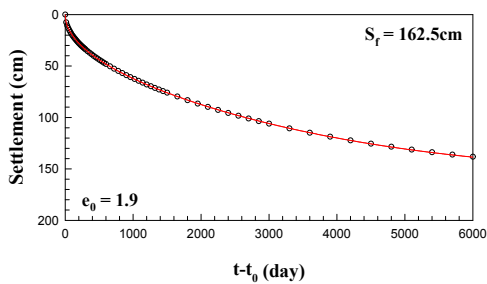
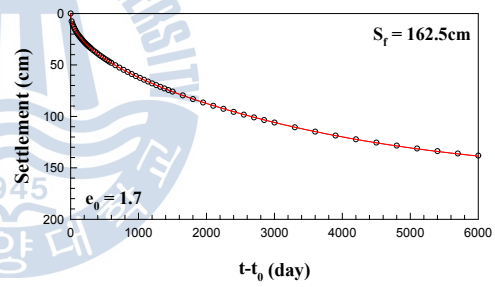
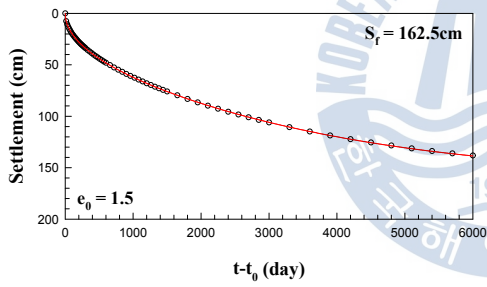
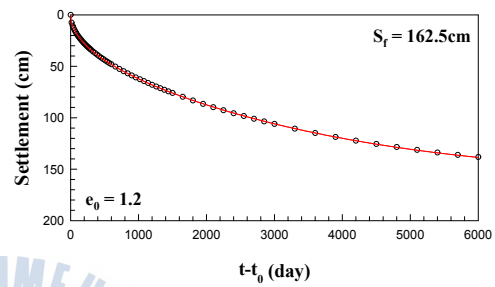
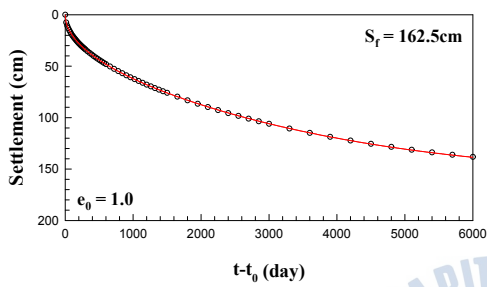
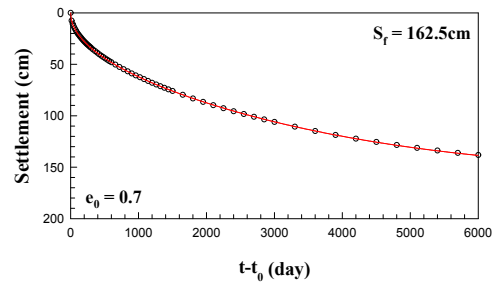
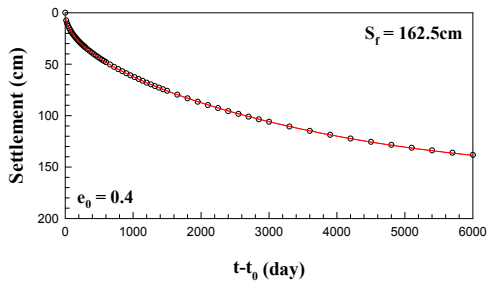
1-D Theory Simulation Method ($U < 80\%$)

부록 D (continued)



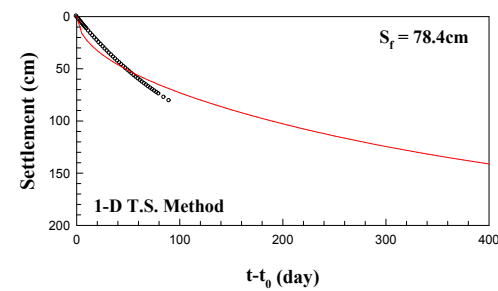
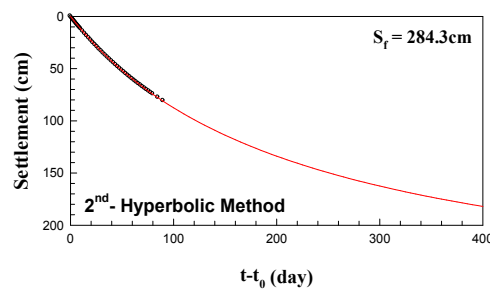
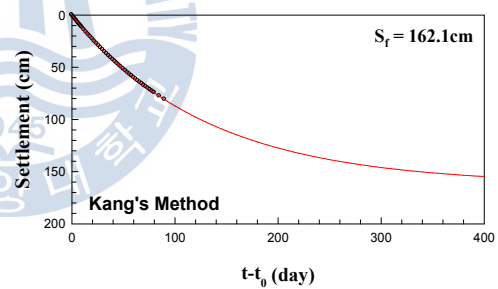
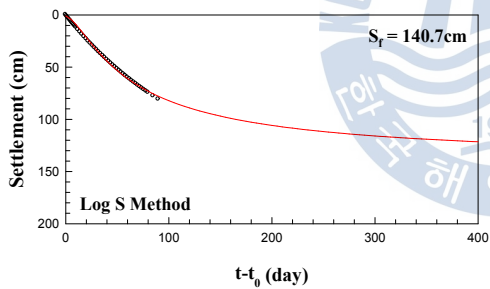
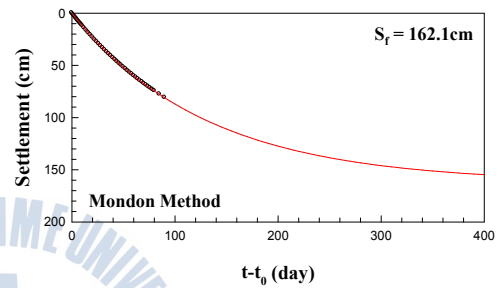
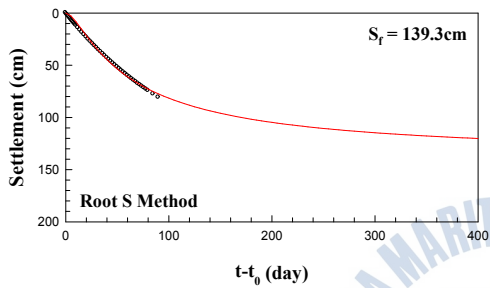
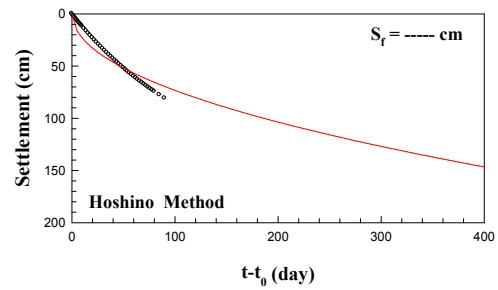
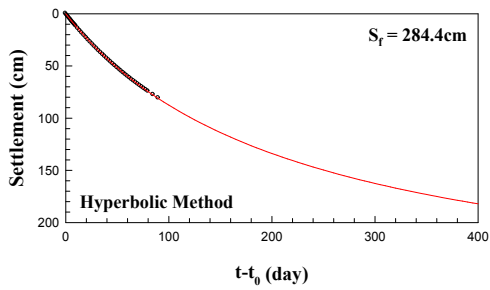
1-D Theory Simulation Method ($U < 90\%$)

부록 D (continued)



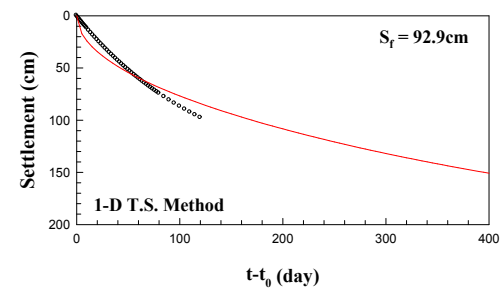
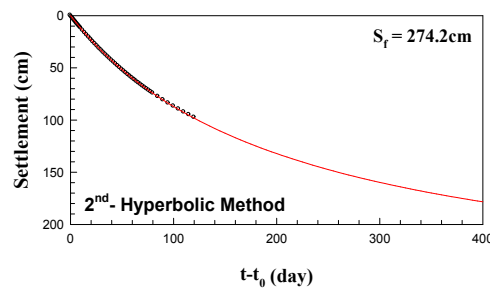
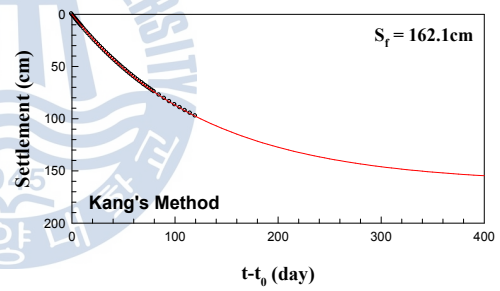
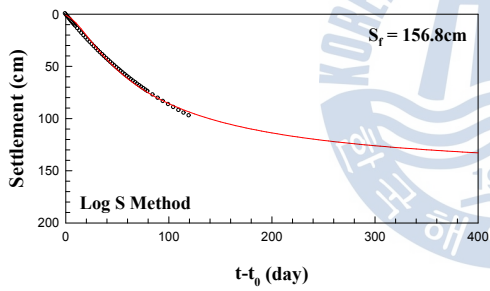
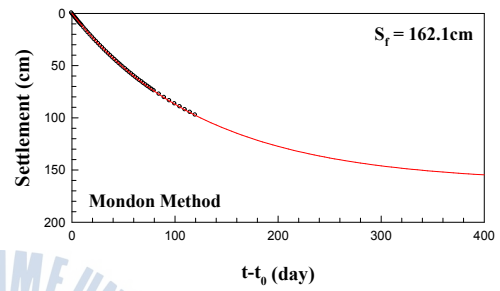
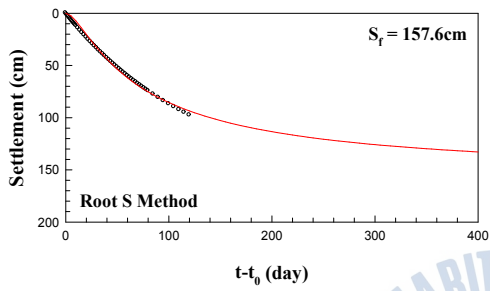
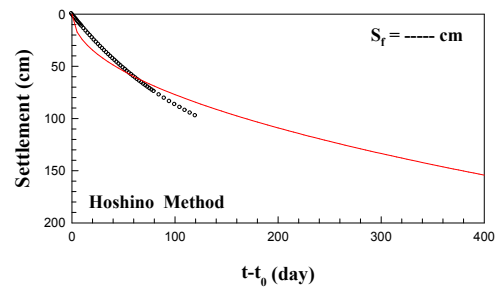
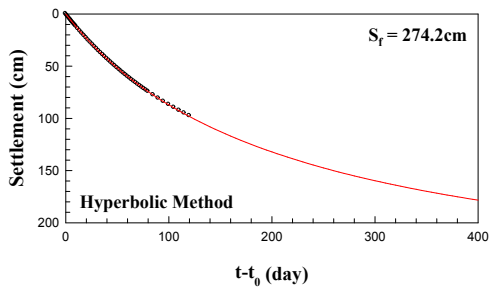
1-D Theory Simulation Method ($U < 95\%$)

부록 D (Continued)



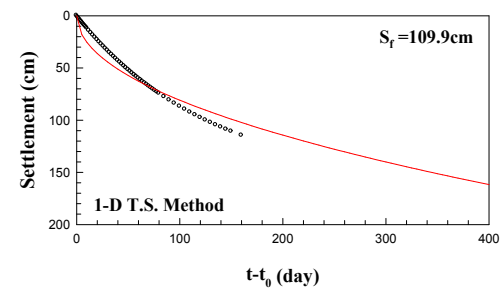
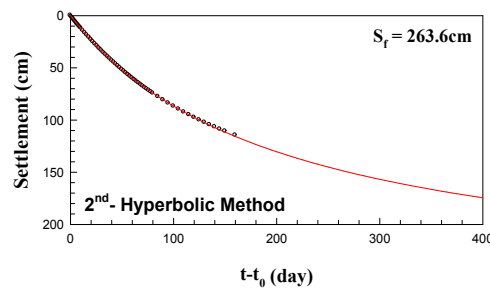
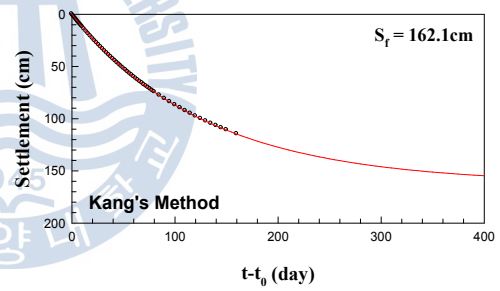
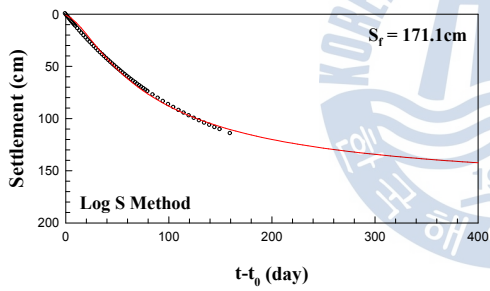
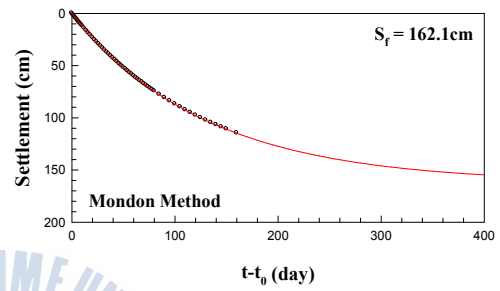
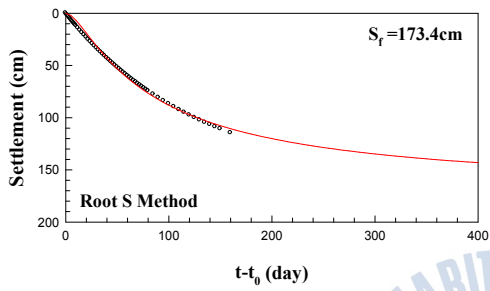
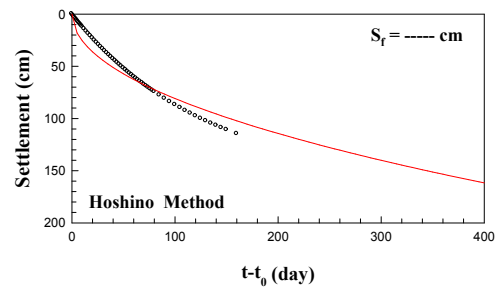
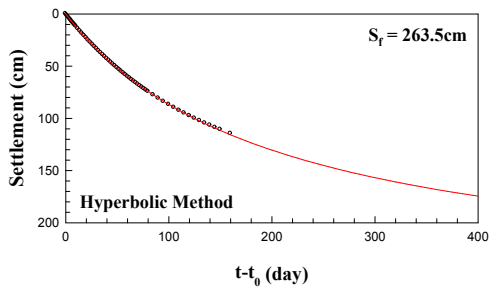
Vertical Drain Theory ($U < 50\%$)

부록 E



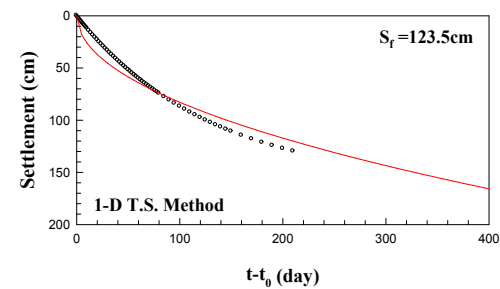
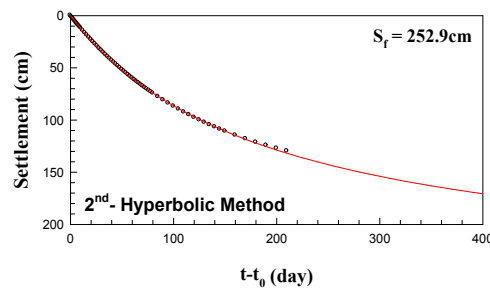
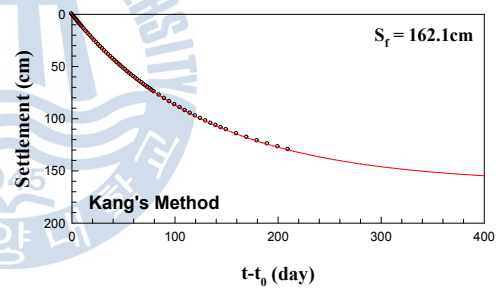
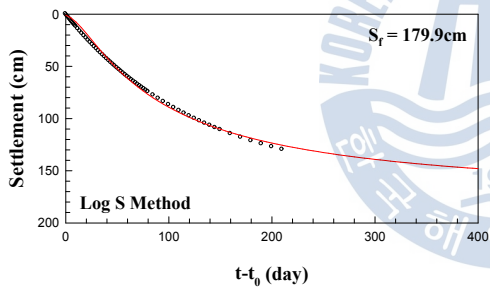
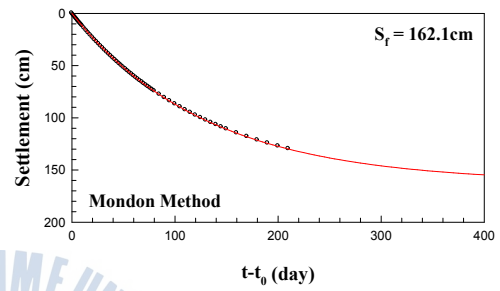
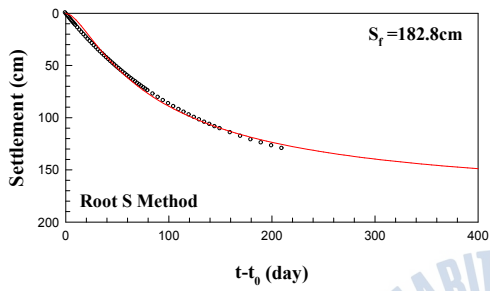
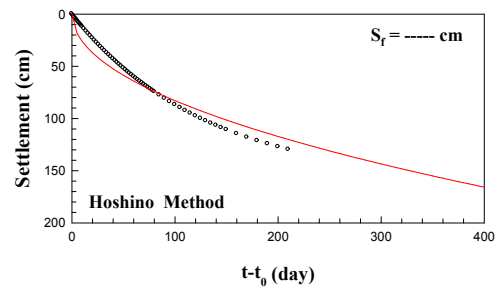
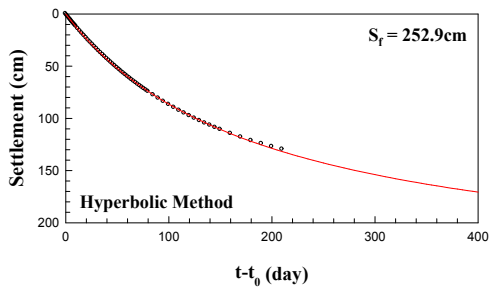
Vertical Drain Theory ($U < 60\%$)

부록 E (continued)



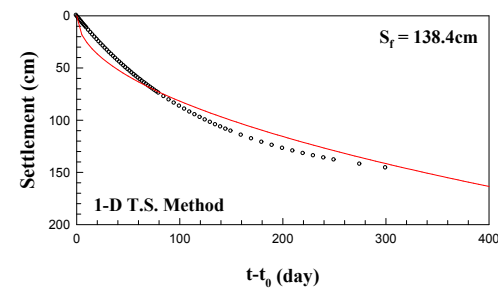
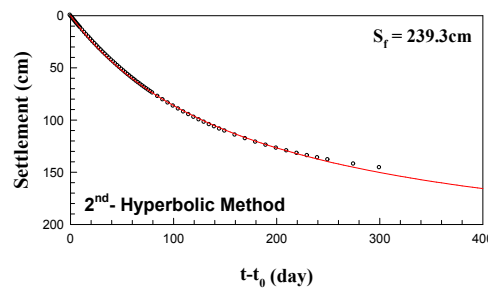
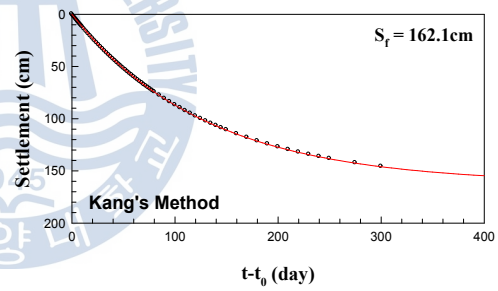
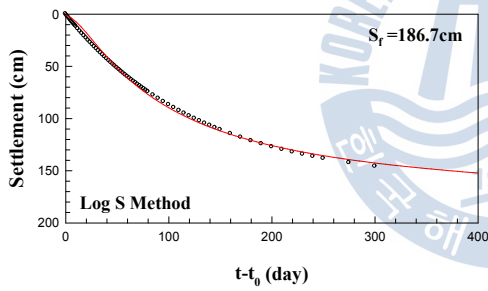
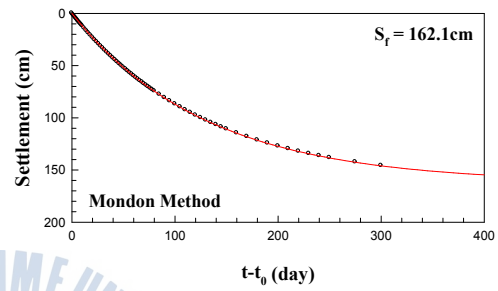
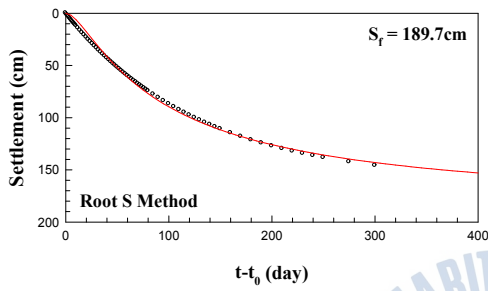
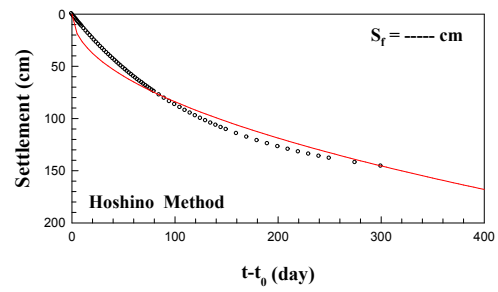
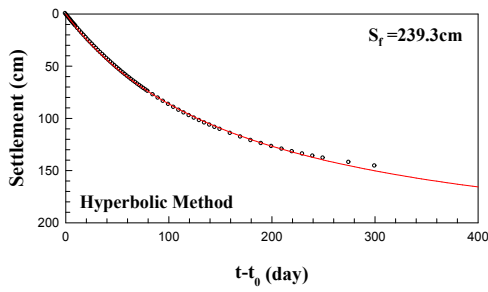
Vertical Drain Theory ($U < 70\%$)

부록 E (continued)



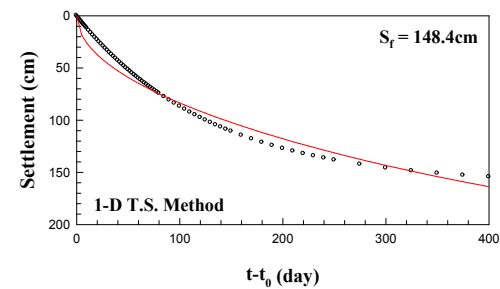
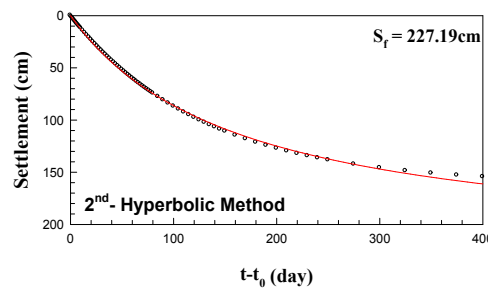
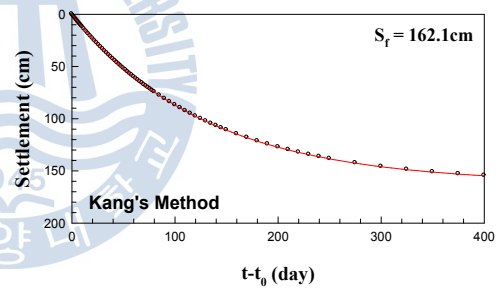
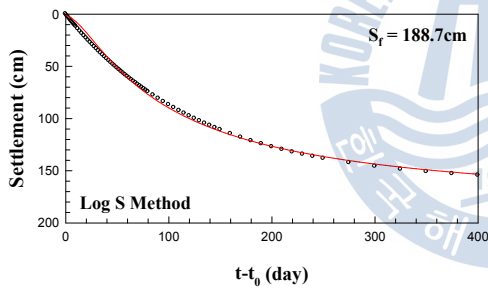
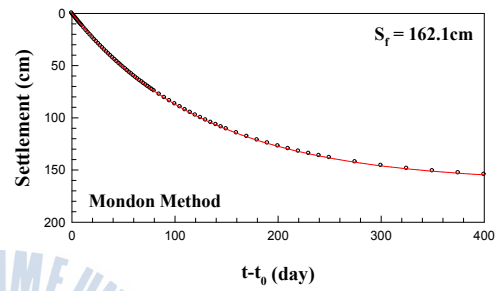
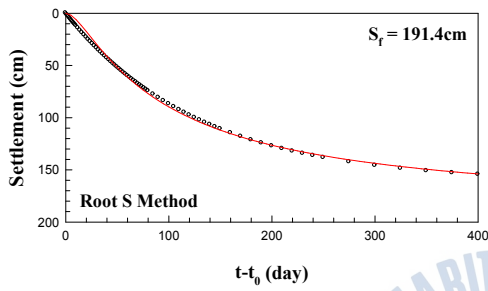
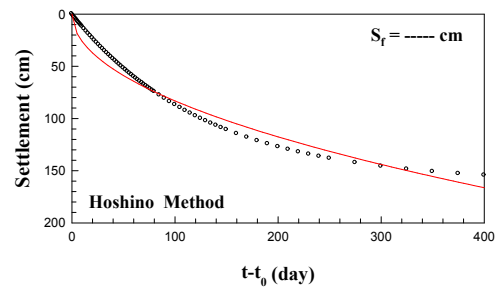
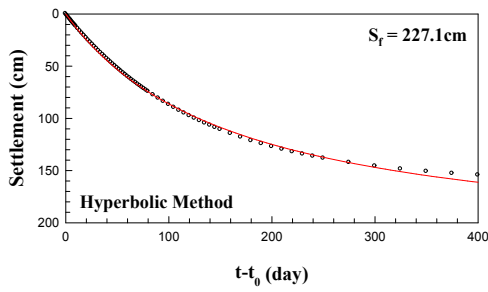
Vertical Drain Theory ($U < 80\%$)

부록 E (continued)



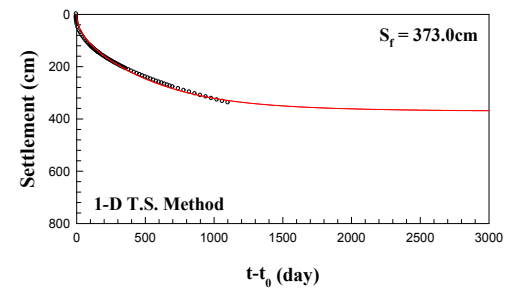
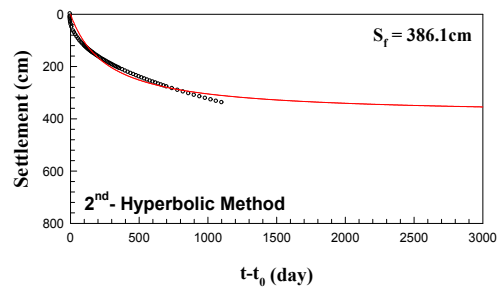
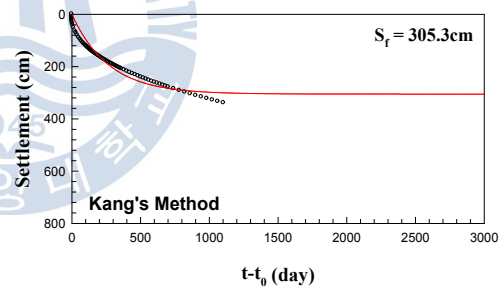
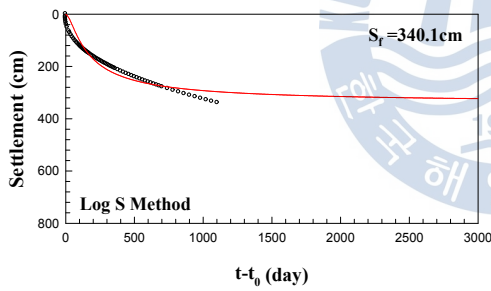
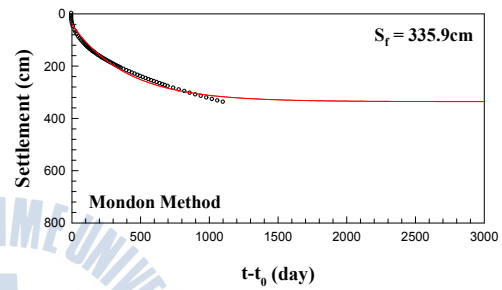
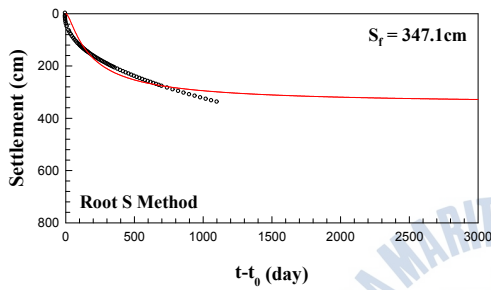
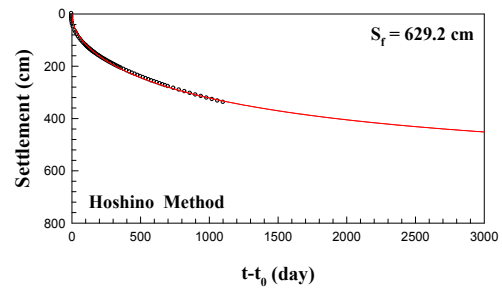
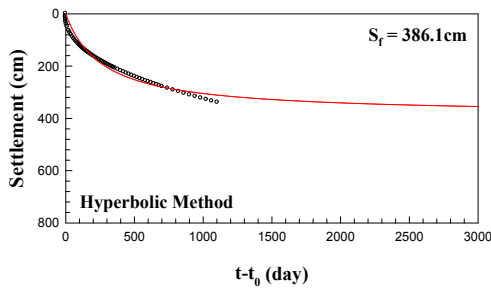
Vertical Drain Theory ($U < 90\%$)

부록 E (continued)



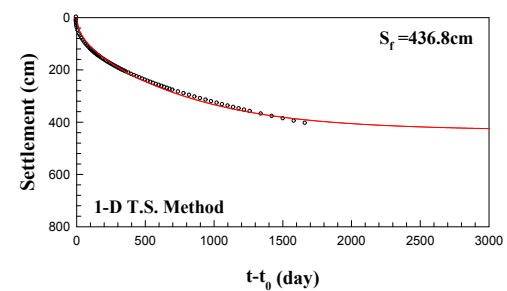
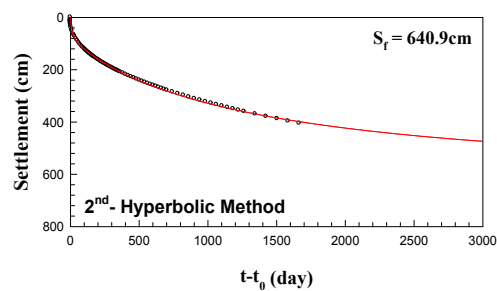
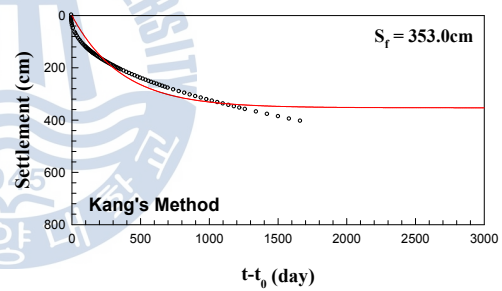
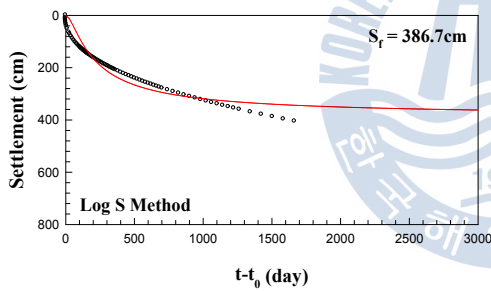
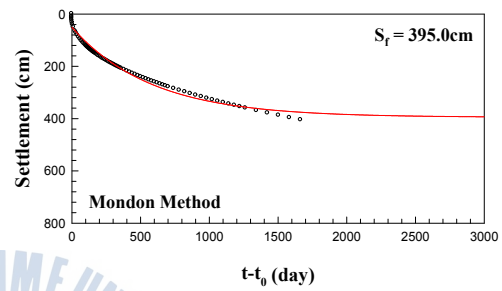
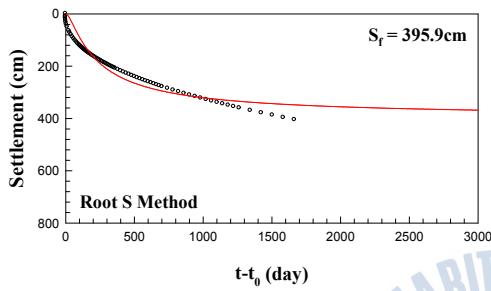
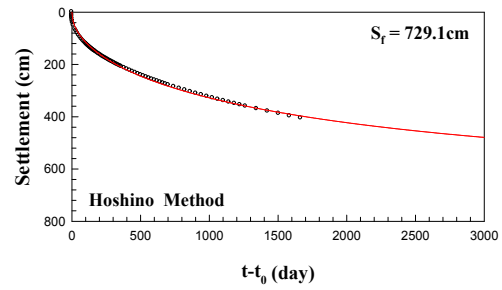
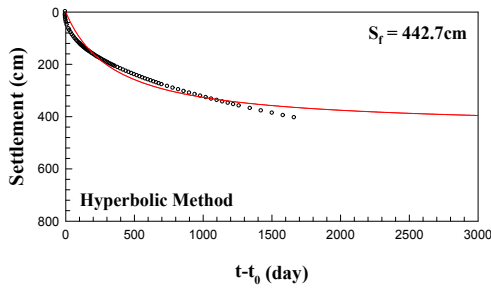
Vertical Drain Theory ($U < 95\%$)

부록 E (continued)



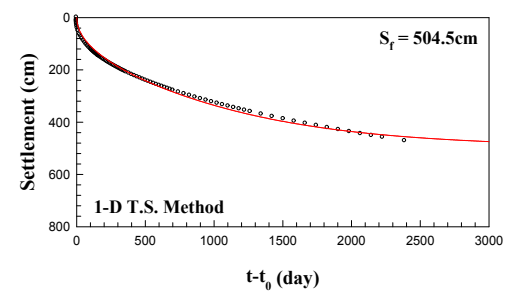
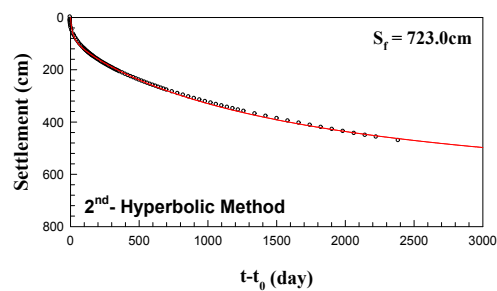
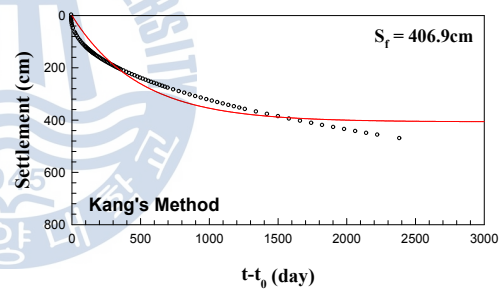
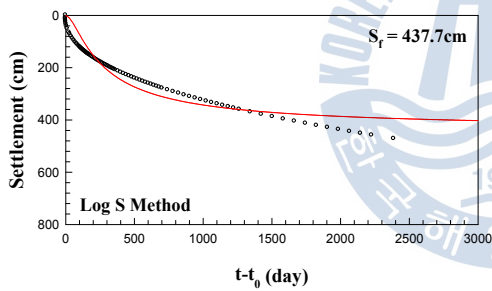
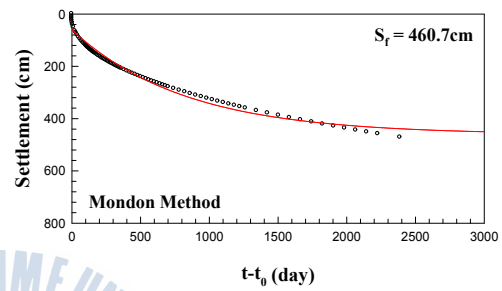
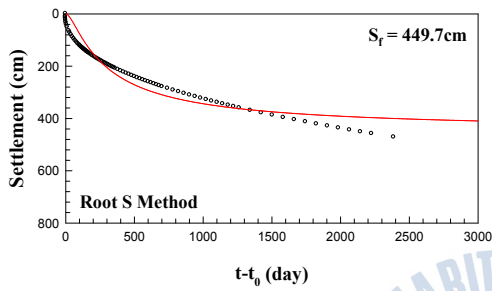
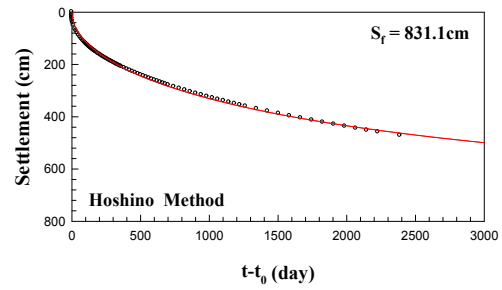
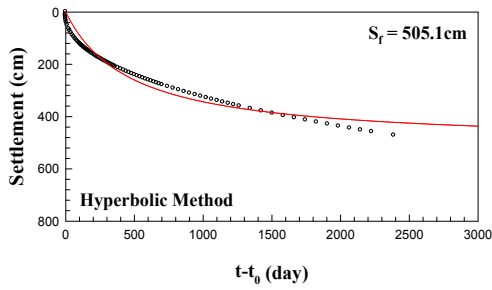
F.E.M Analysis (U<50%)

부록 F



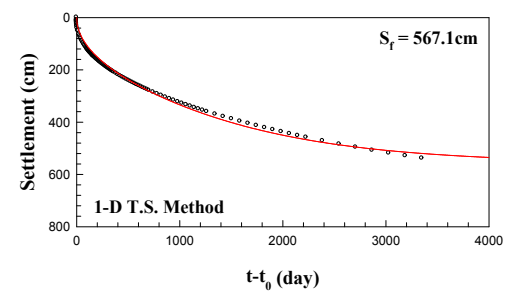
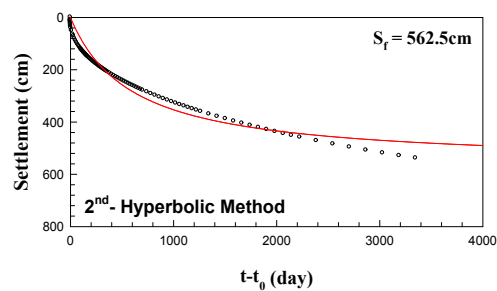
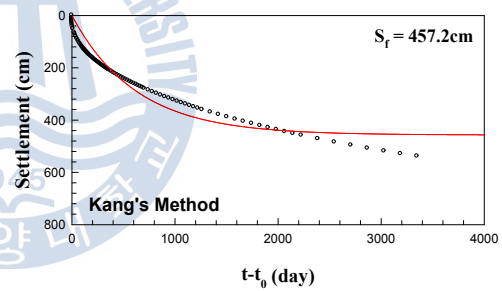
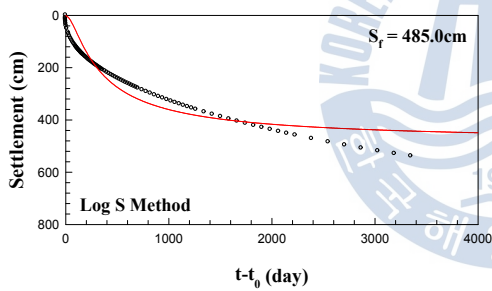
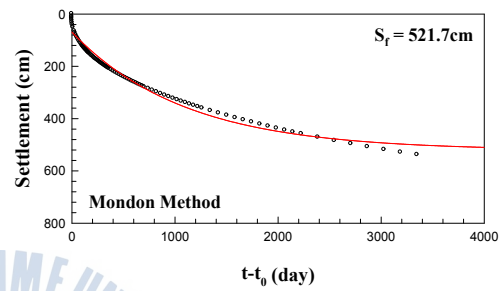
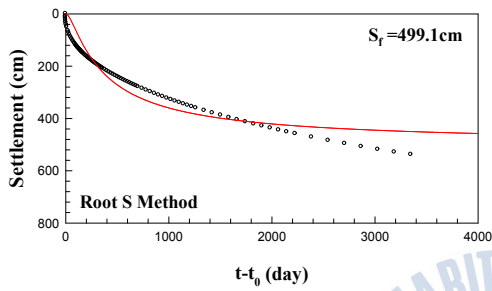
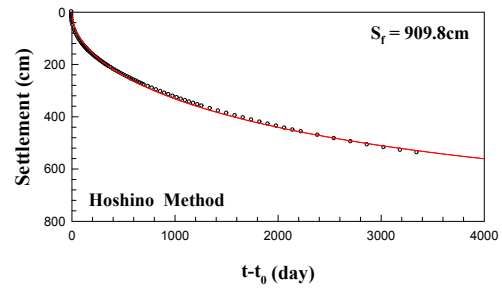
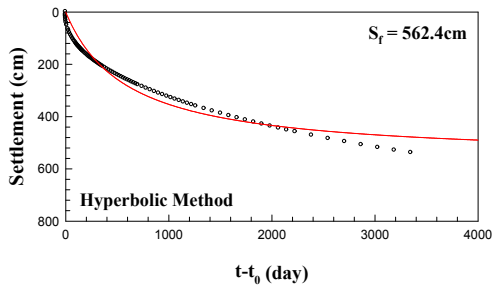
F.E.M Analysis (U<60%)

부록 F (continued)



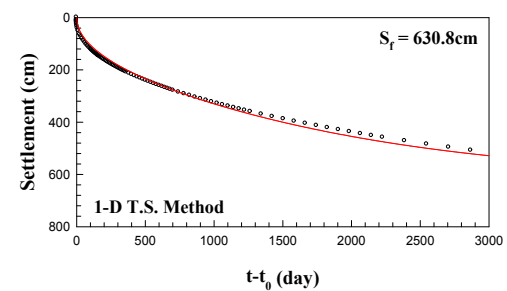
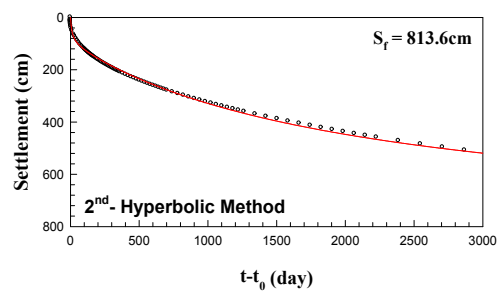
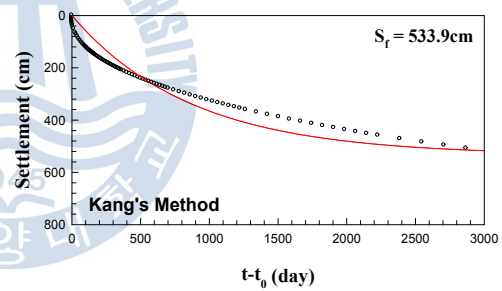
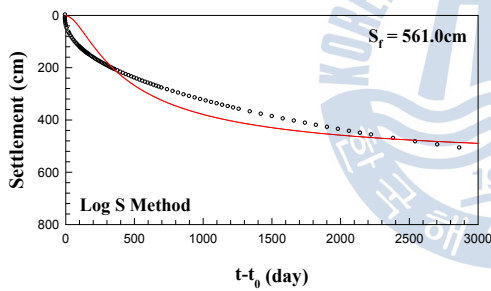
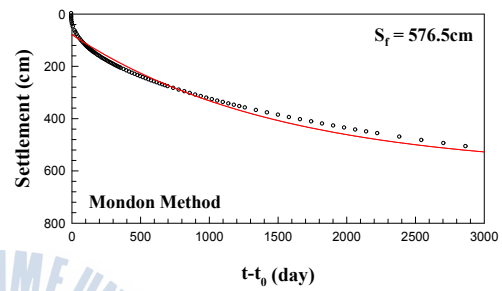
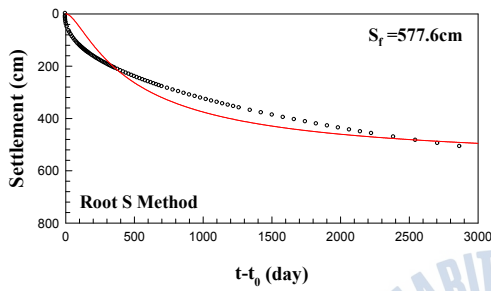
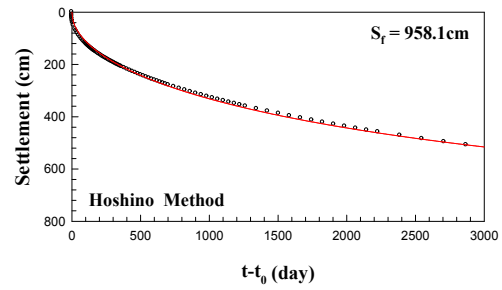
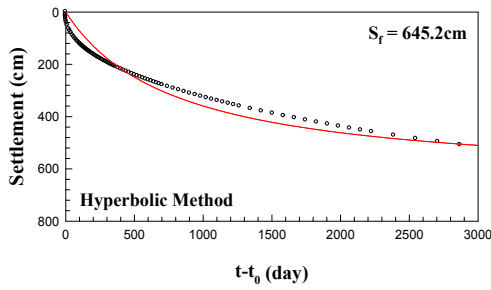
F.E.M Analysis (U<70%)

부록 F (continued)



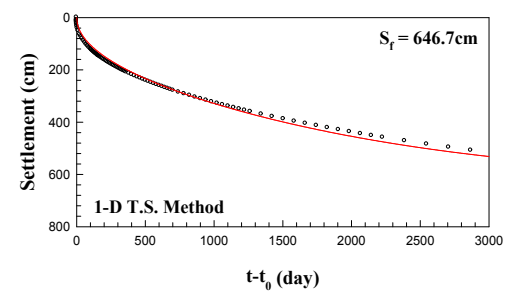
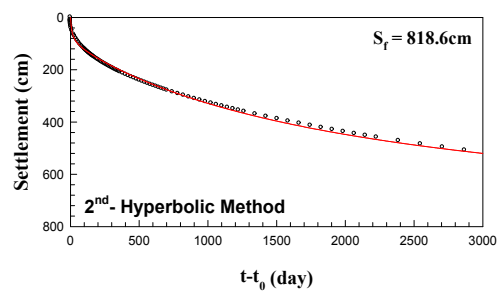
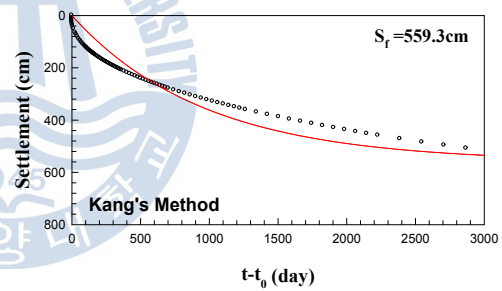
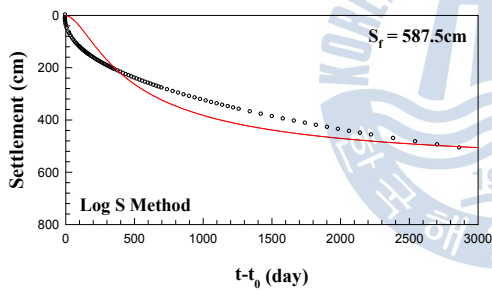
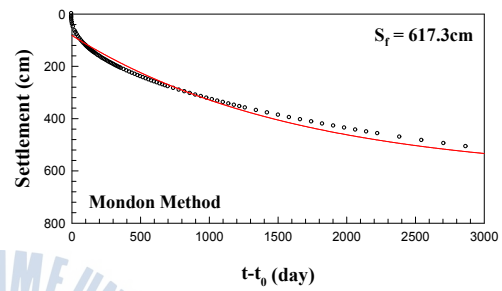
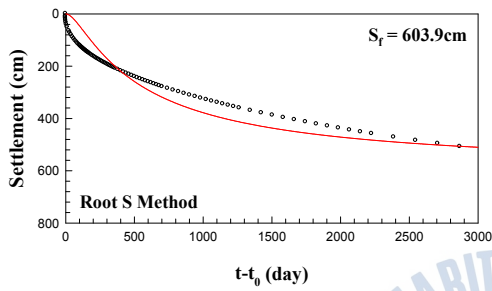
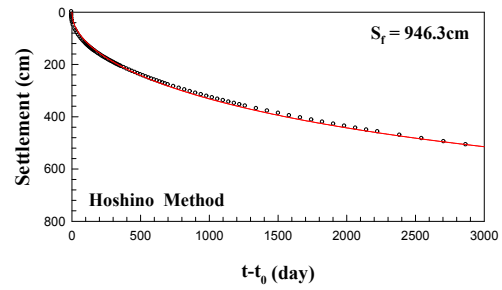
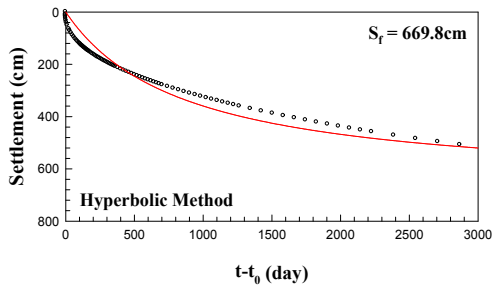
F.E.M Analysis (U<80%)

부록 F (continued)



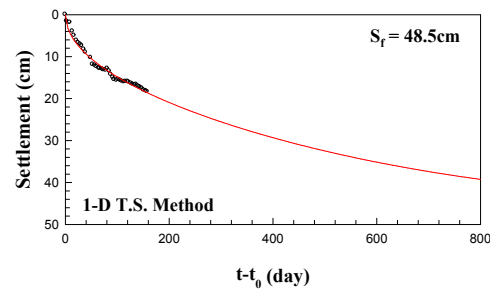
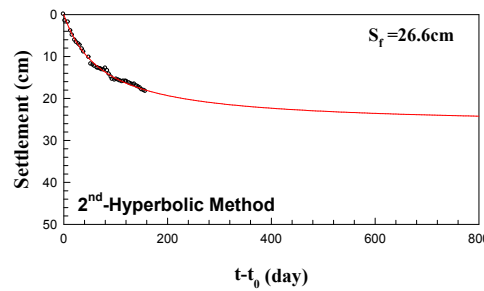
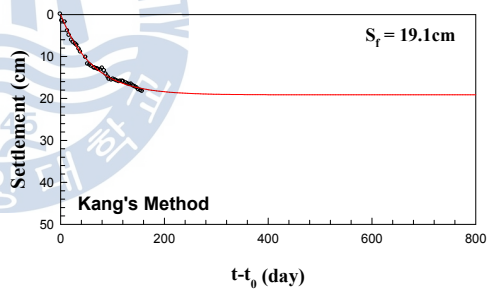
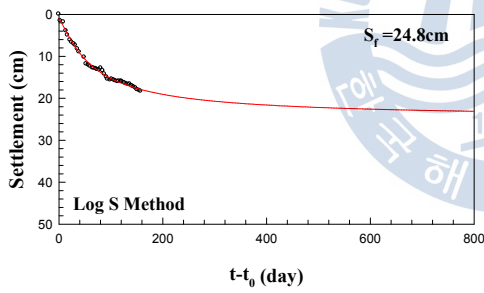
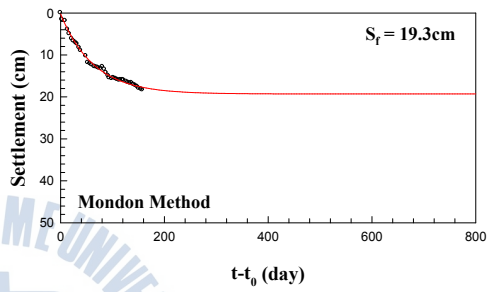
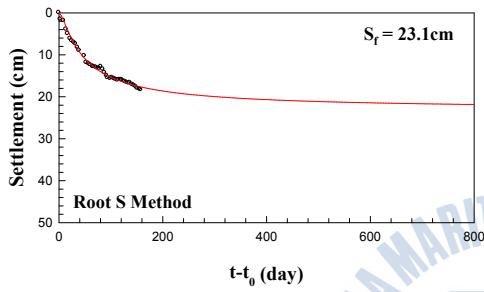
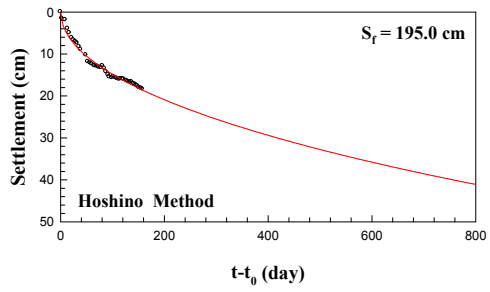
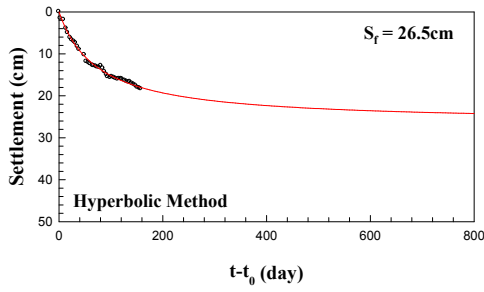
F.E.M Analysis (U<90%)

부록 F (continued)



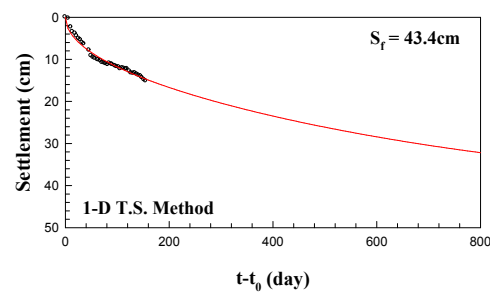
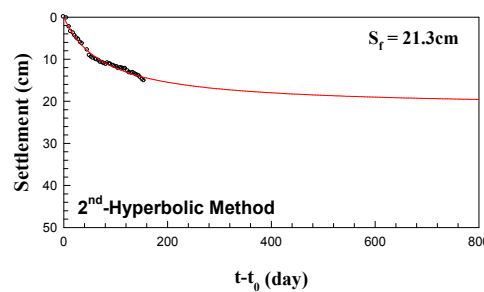
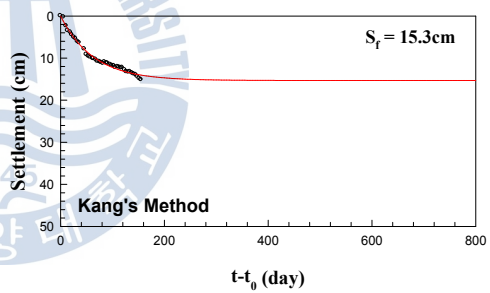
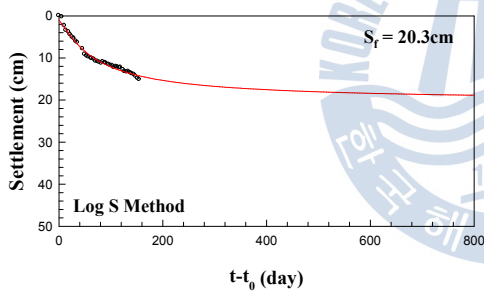
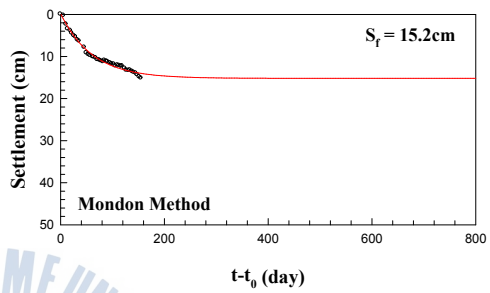
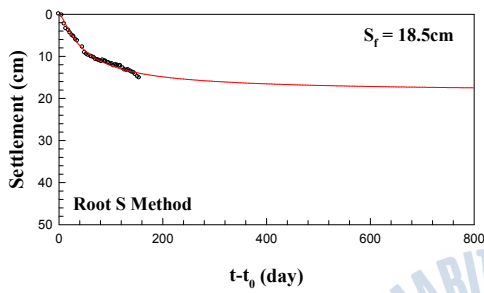
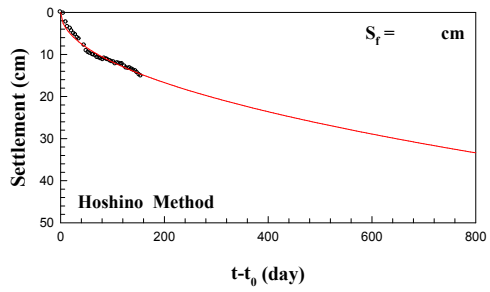
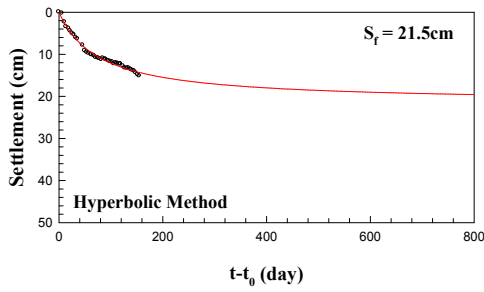
F.E.M Analysis (U<95%)

부록 F (continued)



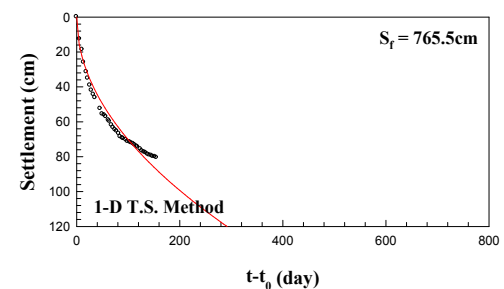
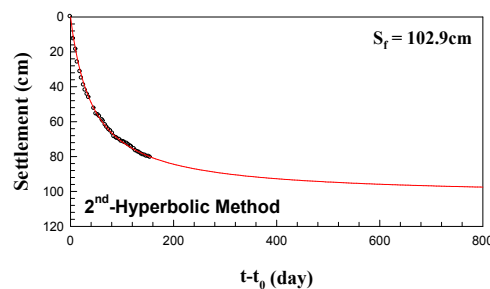
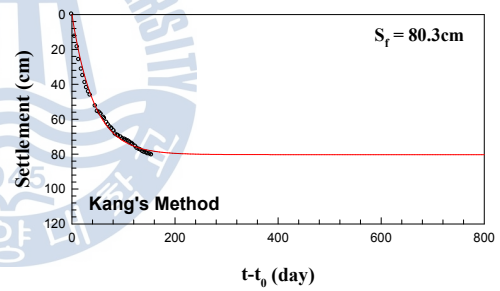
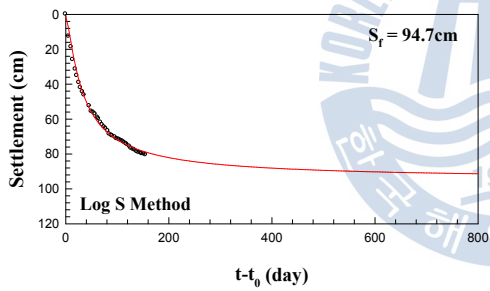
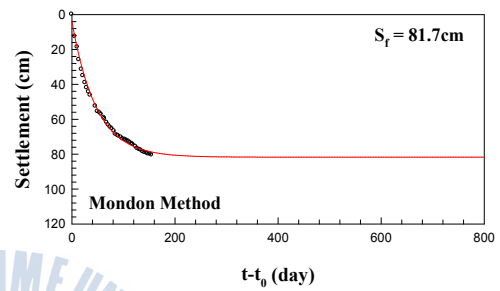
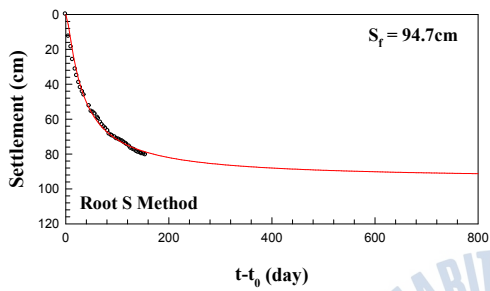
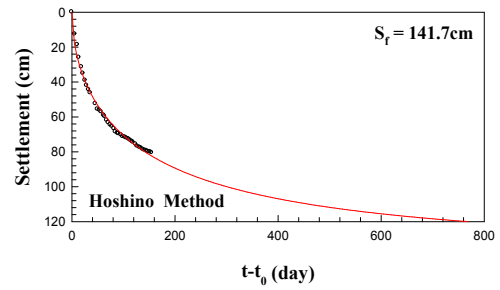
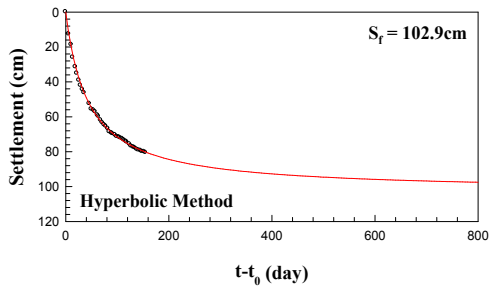
P-1 Plate

부록 G



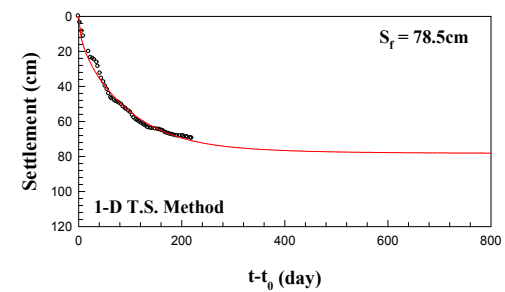
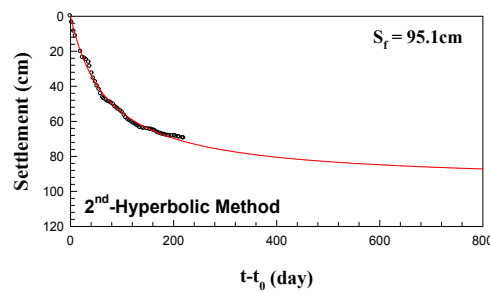
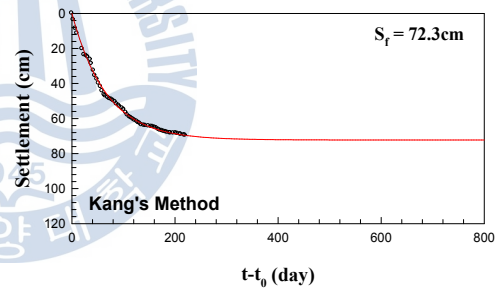
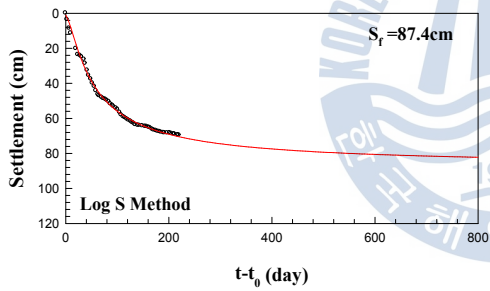
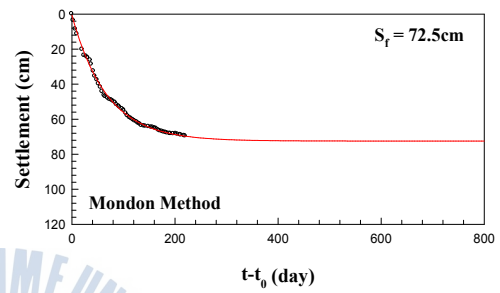
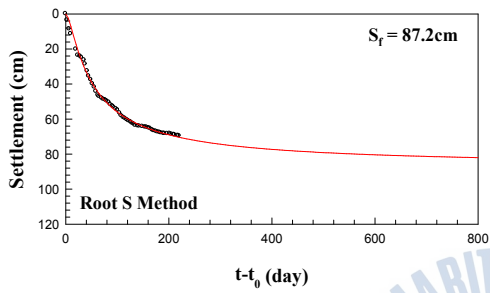
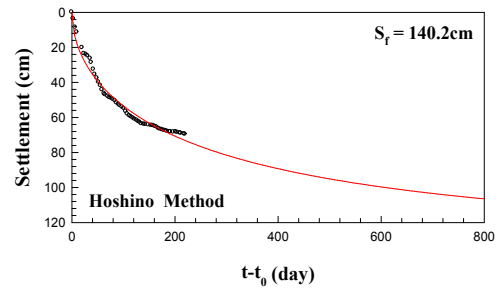
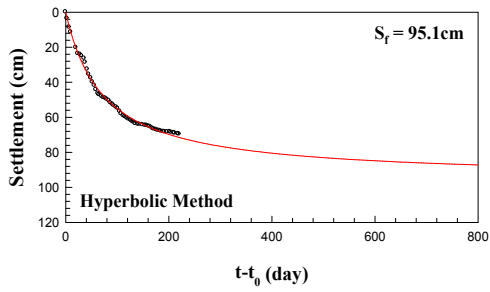
P-2 Plate

부록 G (continued)



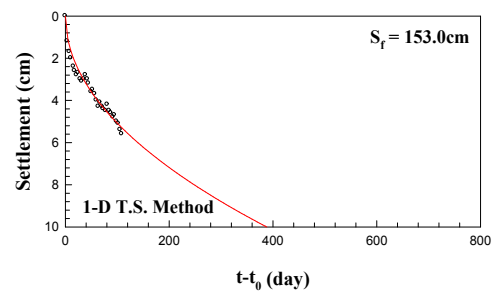
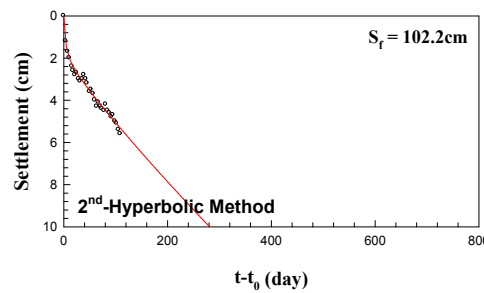
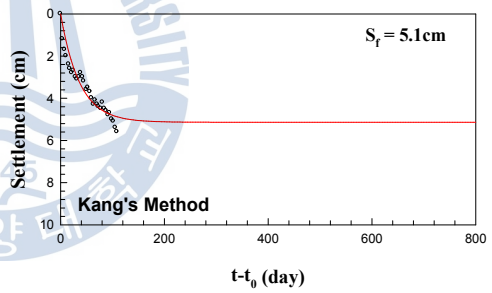
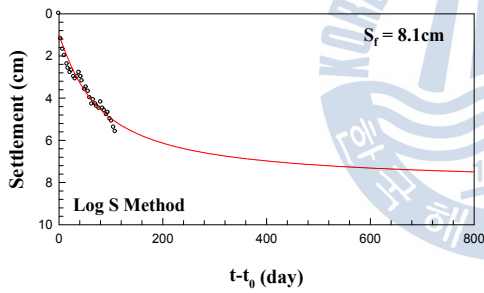
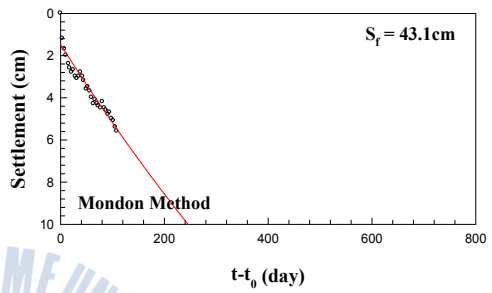
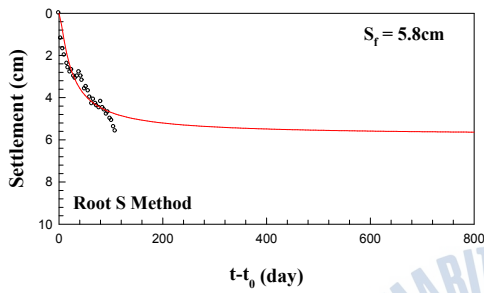
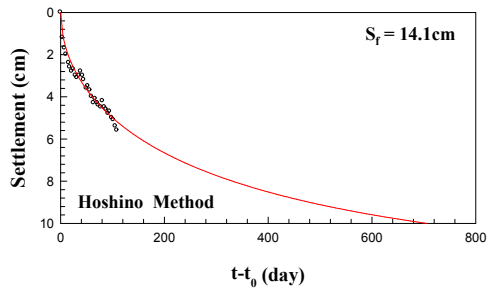
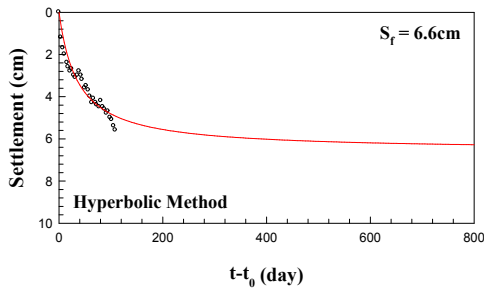
P-3 Plate

부록 G (continued)



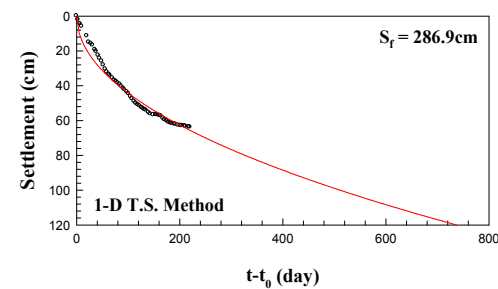
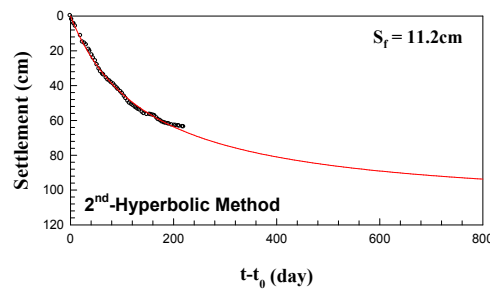
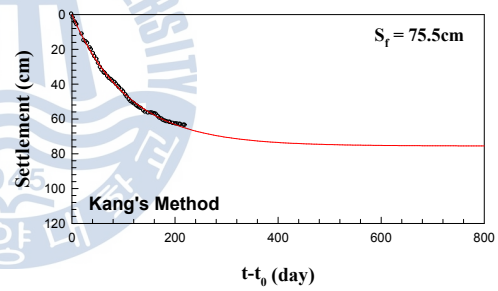
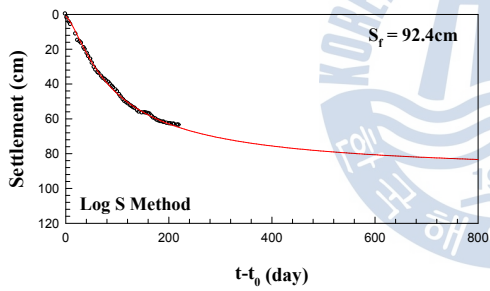
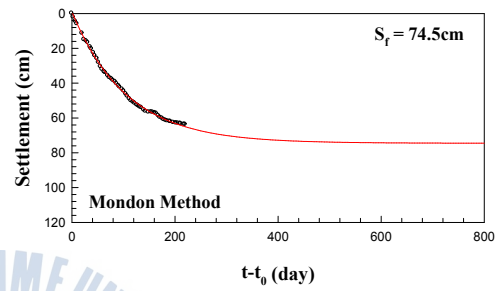
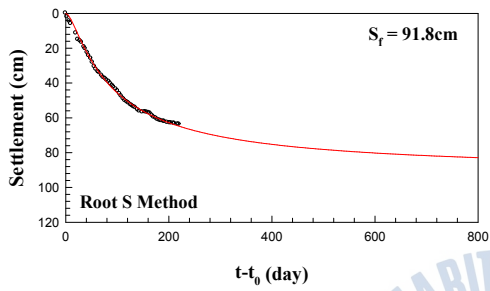
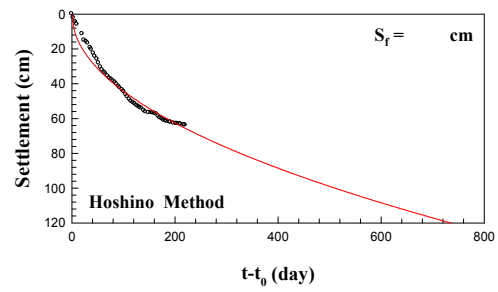
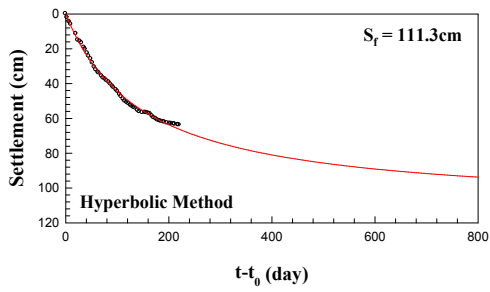
P-4 Plate

부록 G (continued)



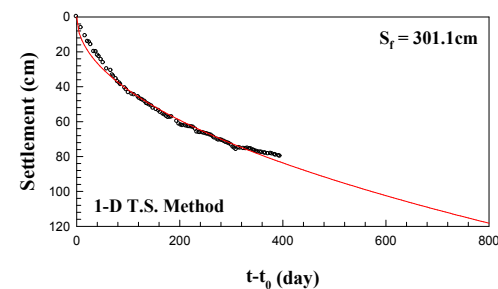
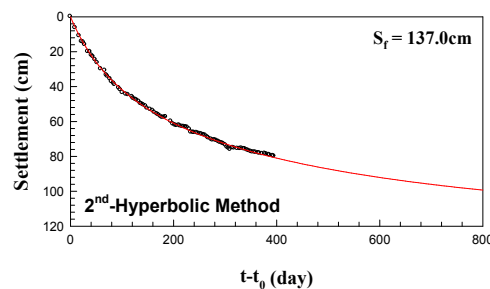
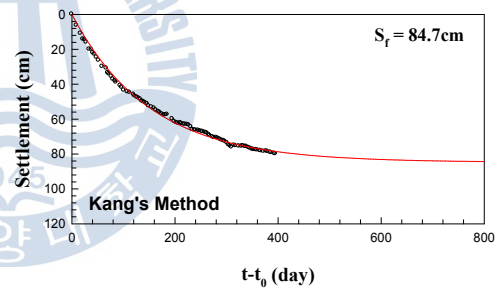
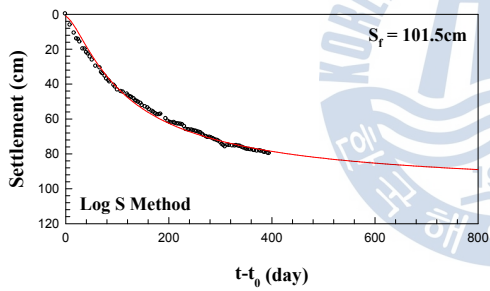
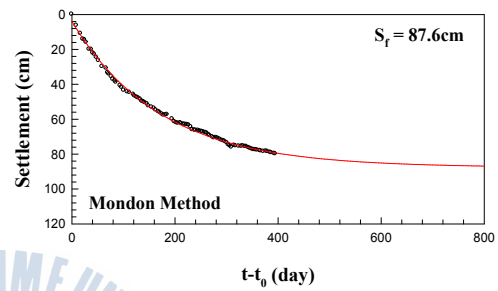
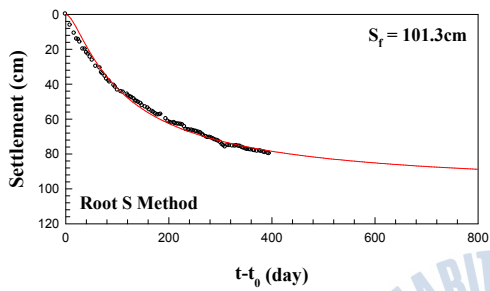
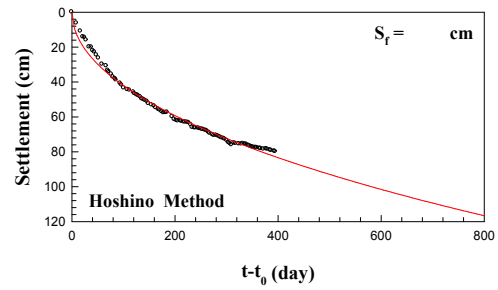
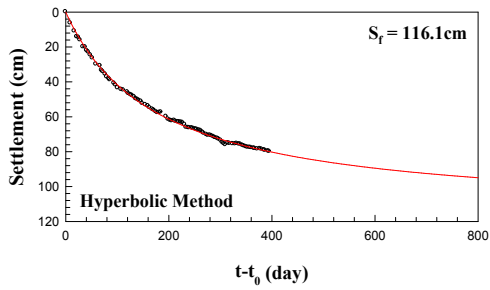
P-5 Plate

부록 G (continued)



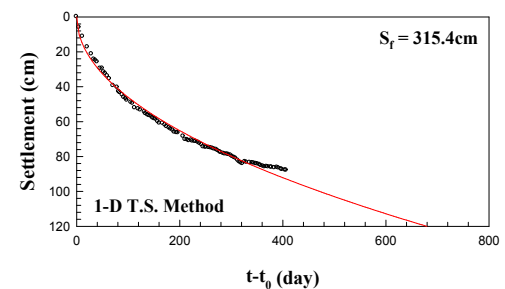
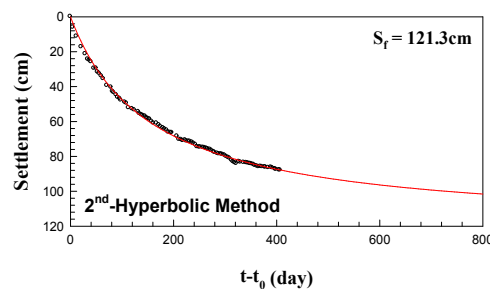
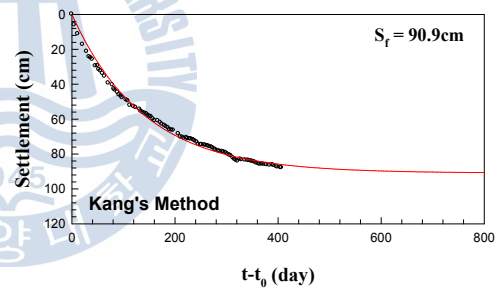
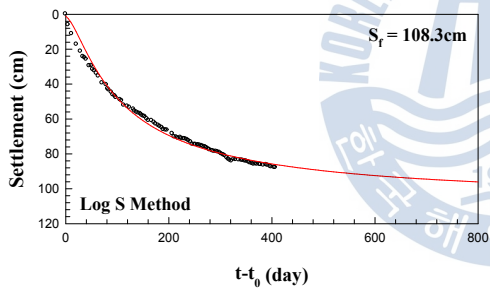
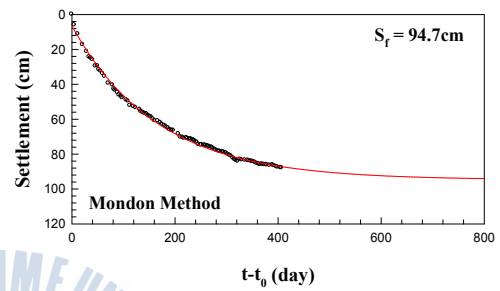
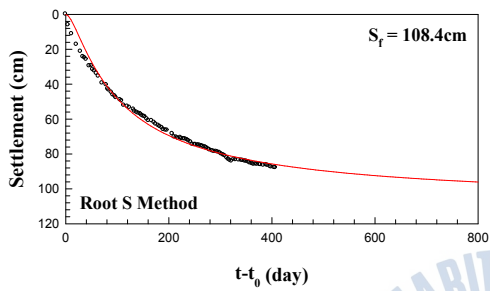
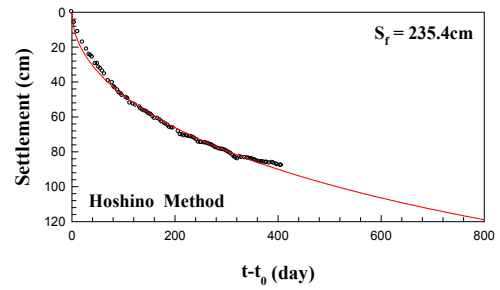
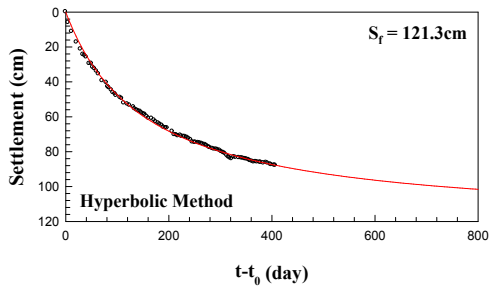
P-10 Plate

부록 G (continued)



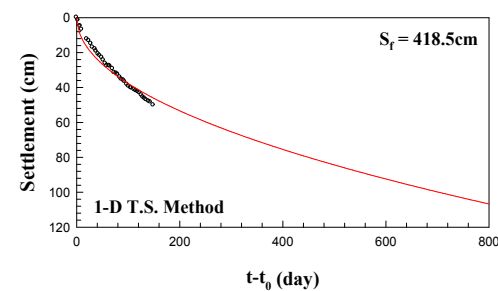
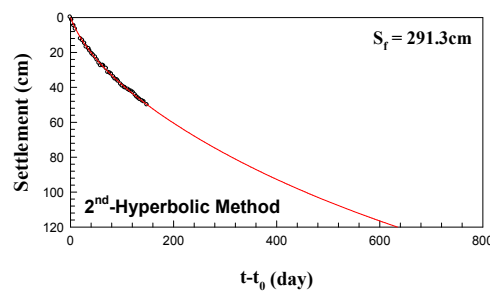
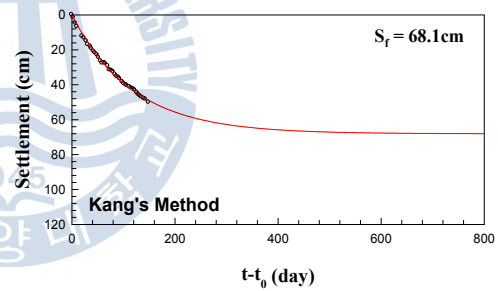
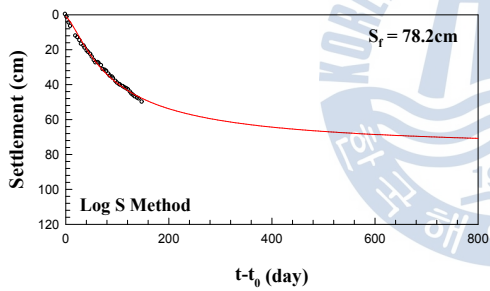
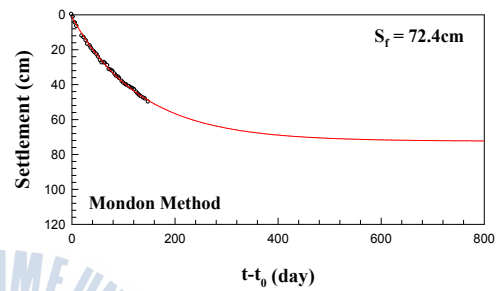
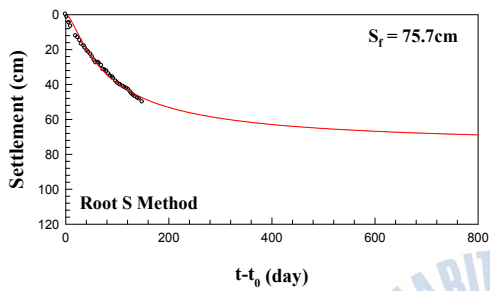
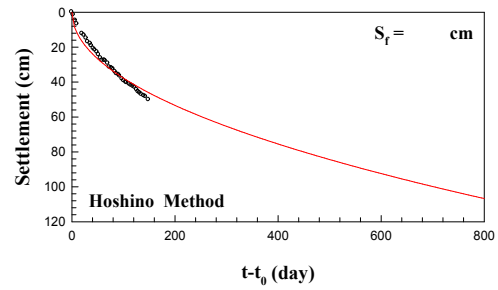
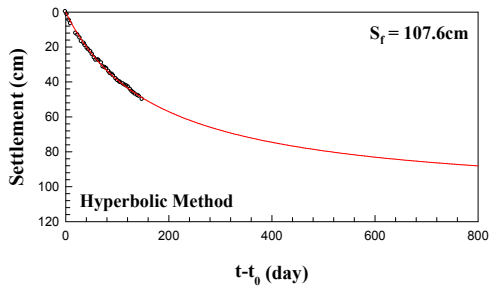
P-16 Plate

부록 G (continued)



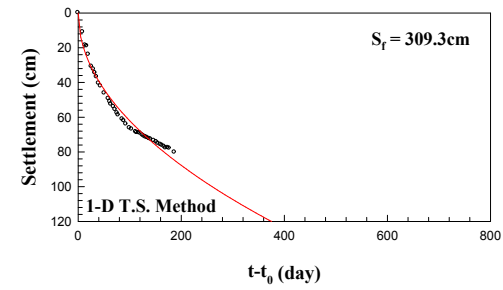
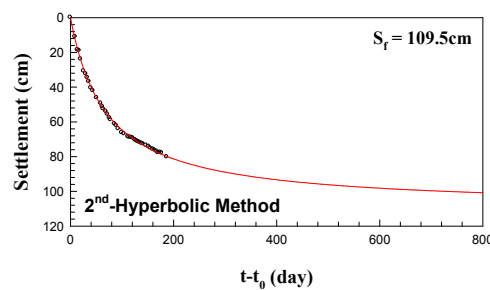
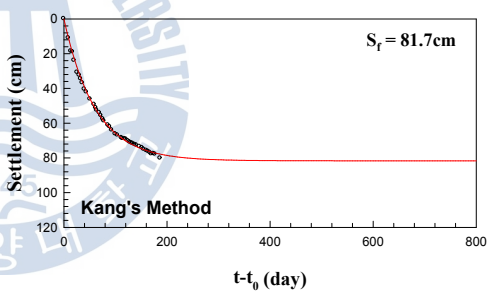
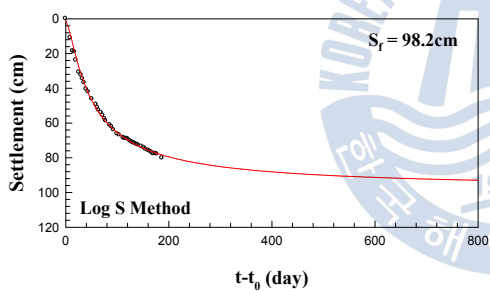
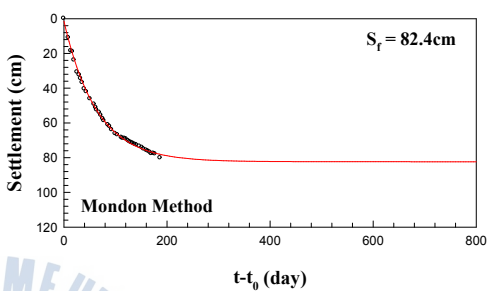
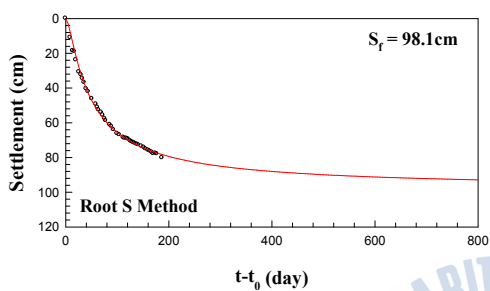
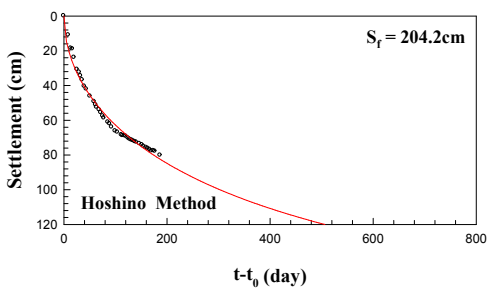
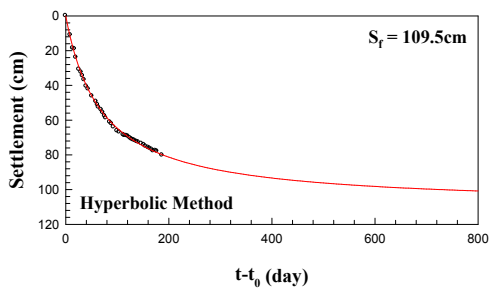
P-17 Plate

부록 G (continued)



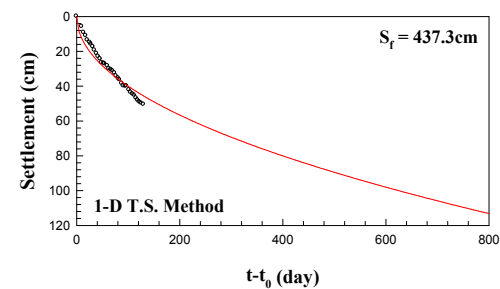
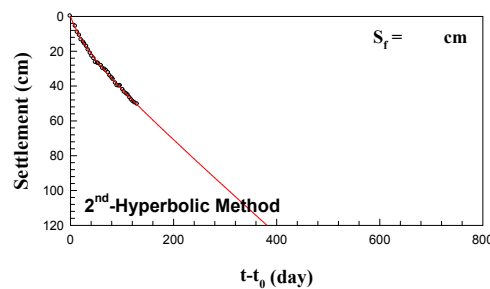
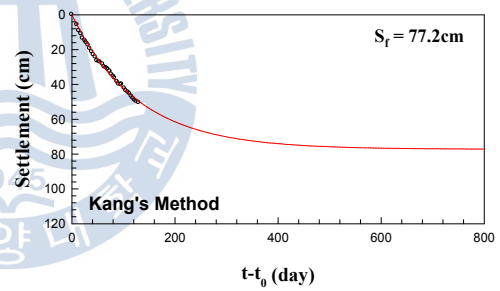
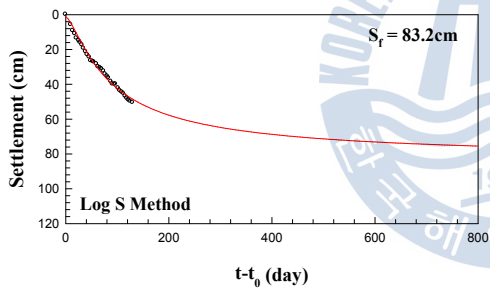
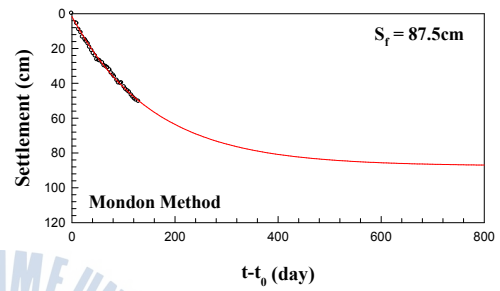
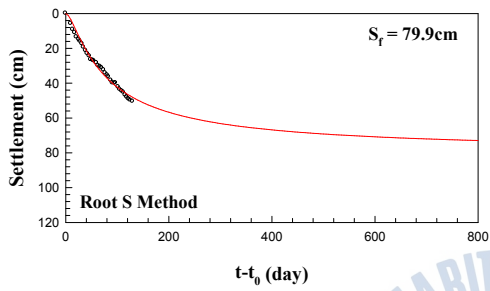
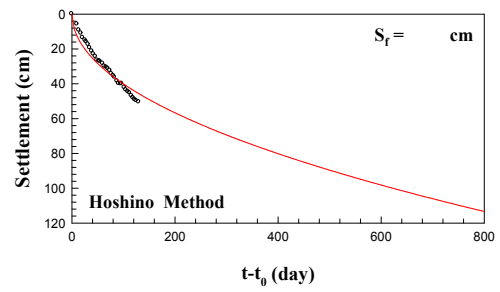
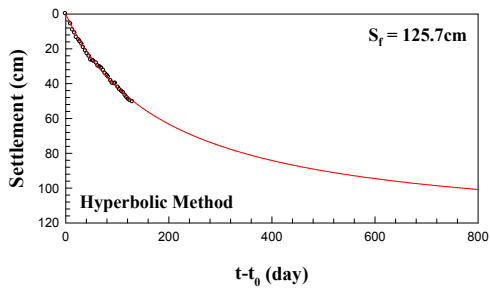
P-18 Plate

부록 G (continued)



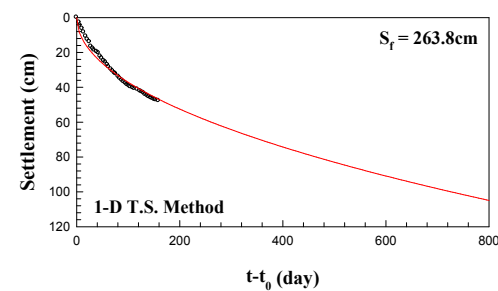
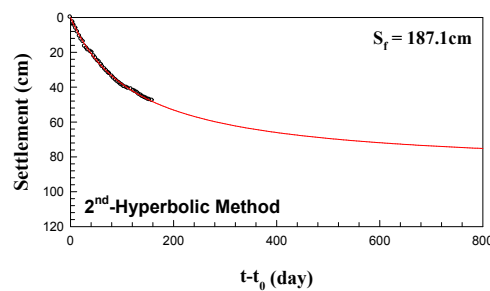
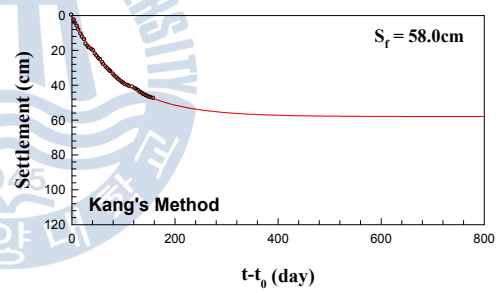
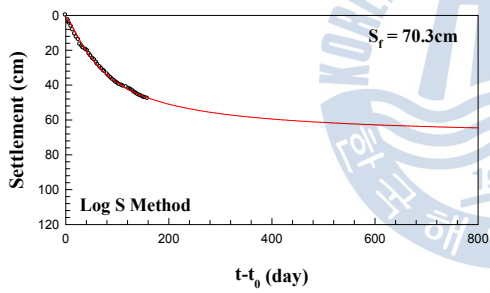
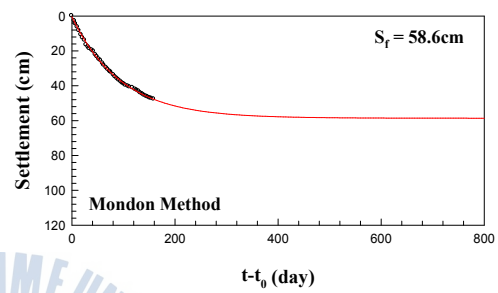
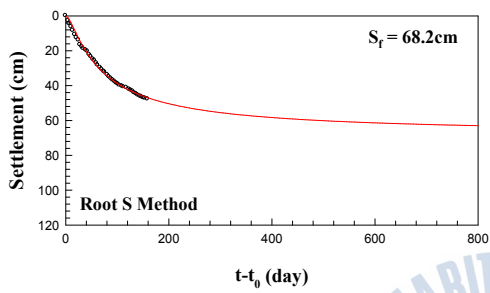
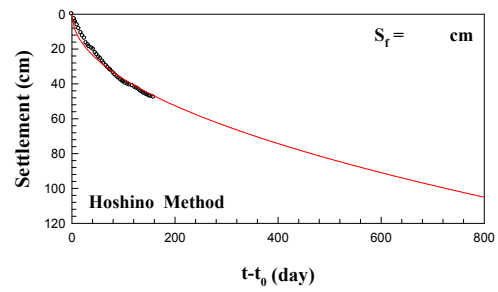
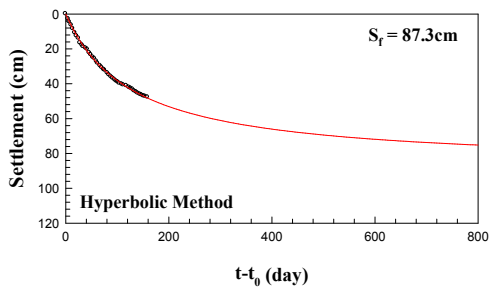
P-19 Plate

부록 G (continued)



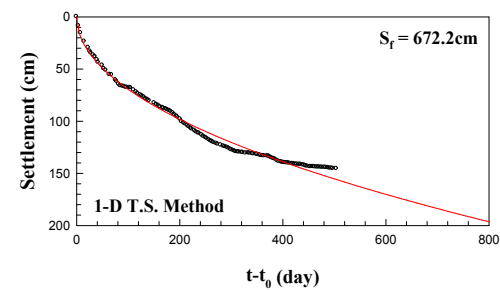
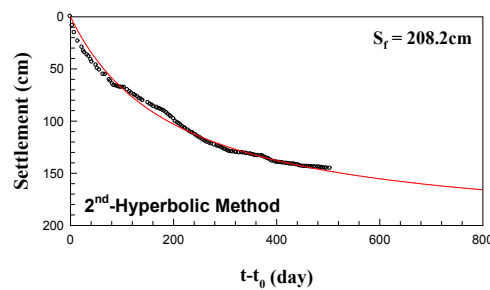
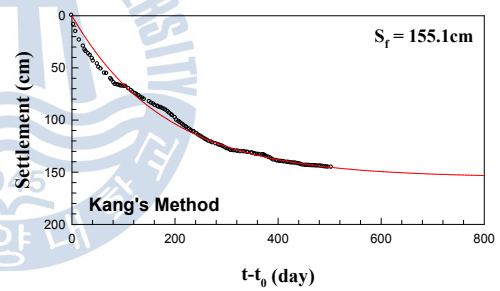
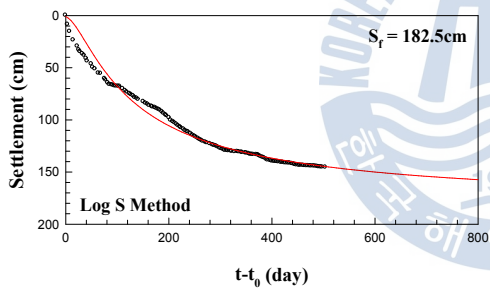
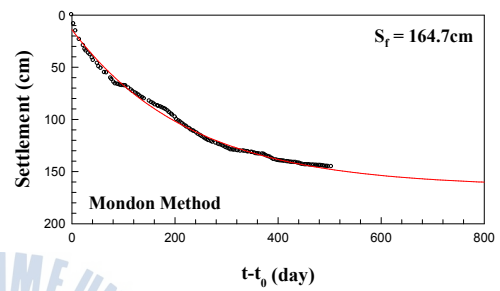
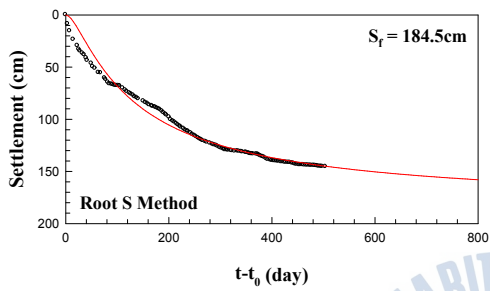
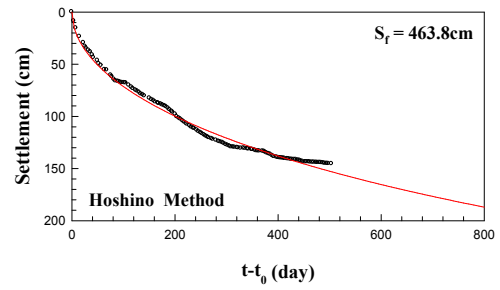
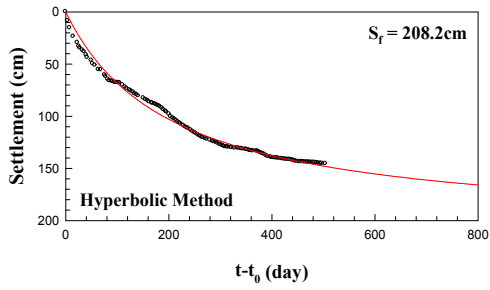
P-23 Plate

부록 G (continued)



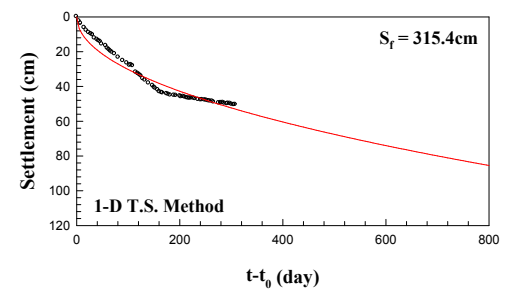
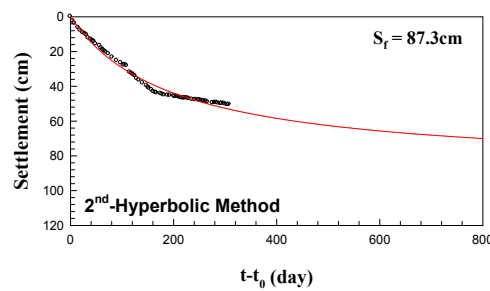
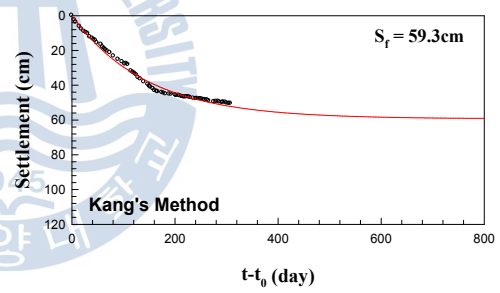
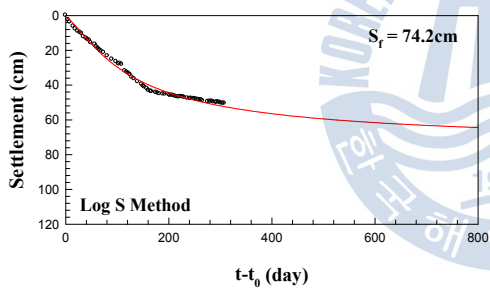
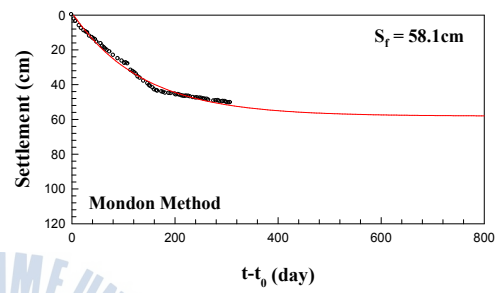
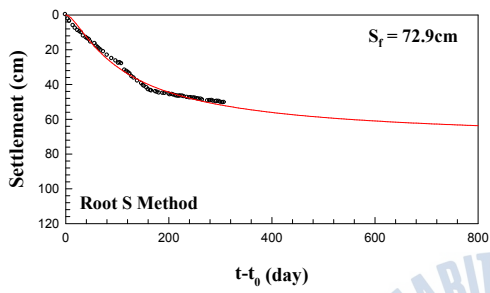
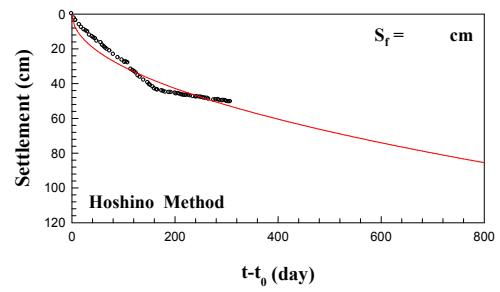
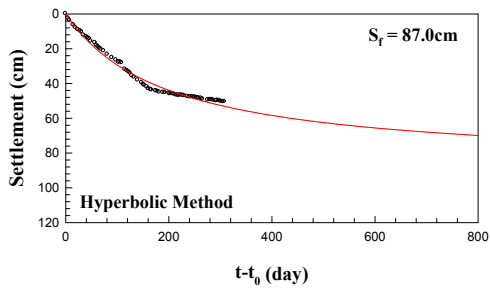
P-30 Plate

부록 G (continued)



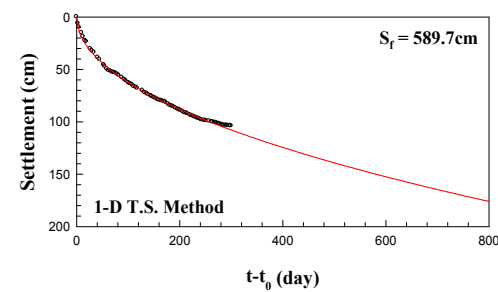
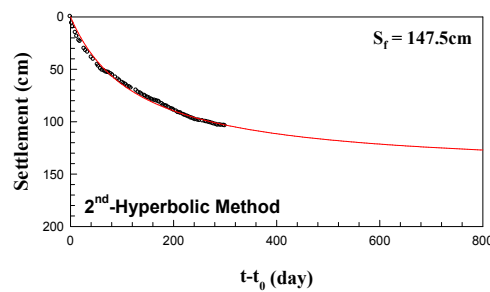
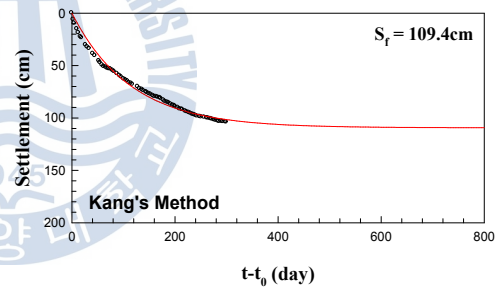
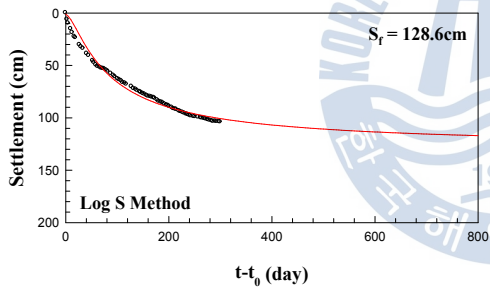
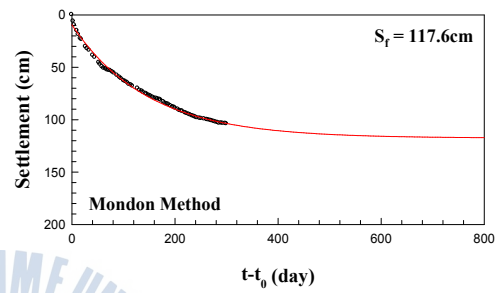
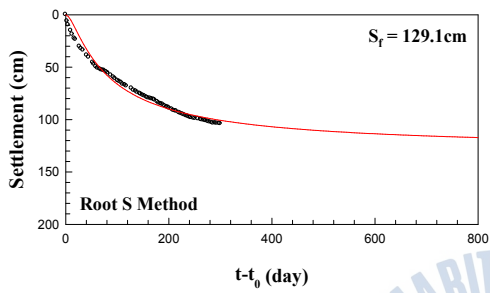
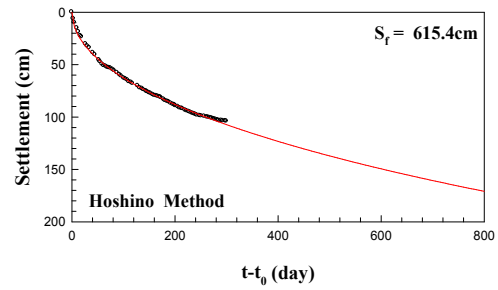
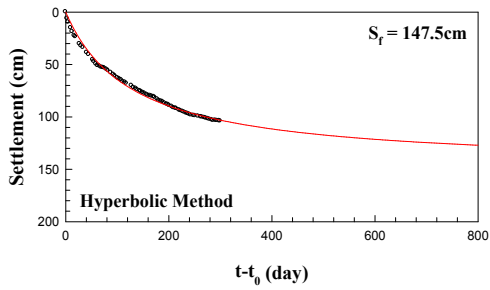
P-40 Plate

부록 G (continued)



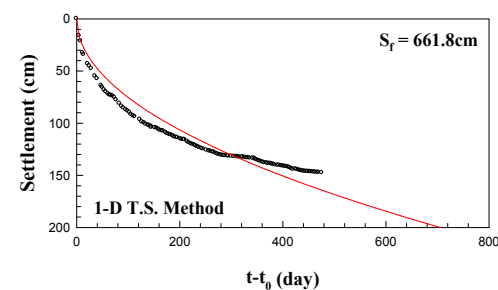
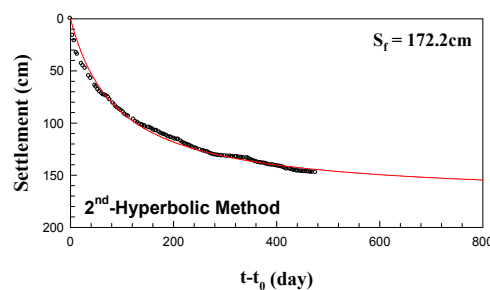
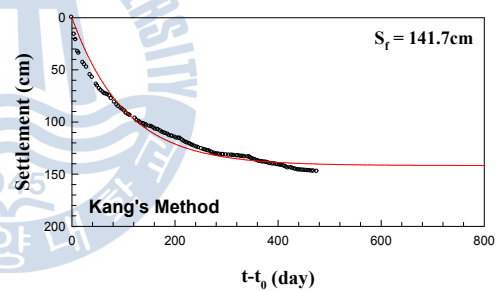
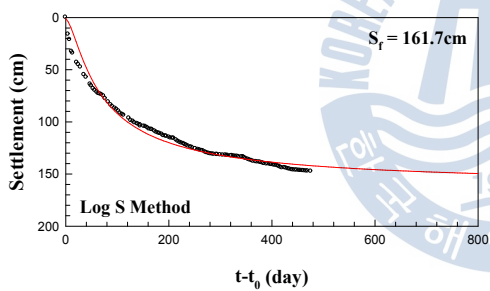
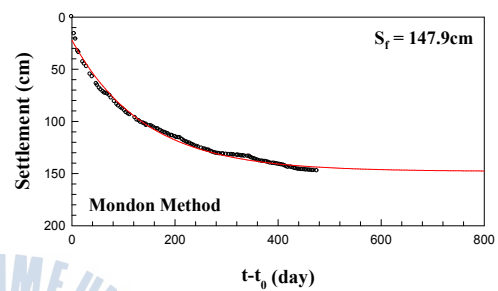
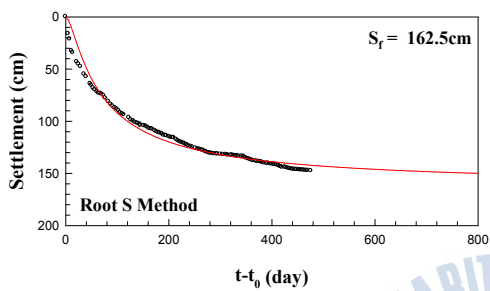
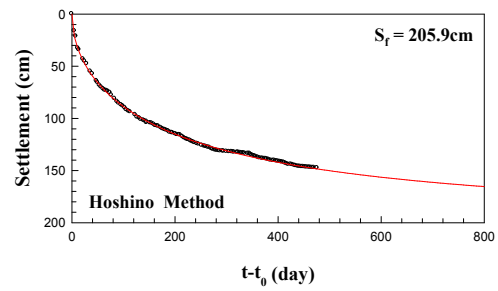
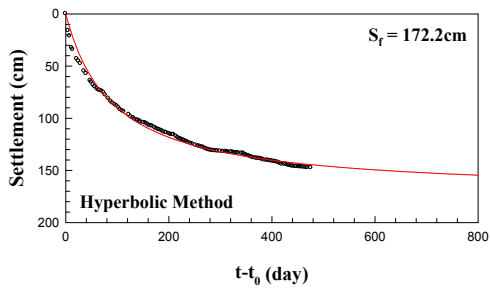
P-44 Plate

부록 G (continued)



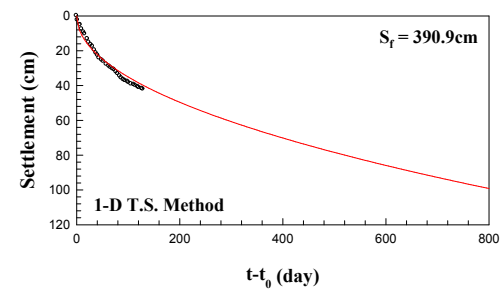
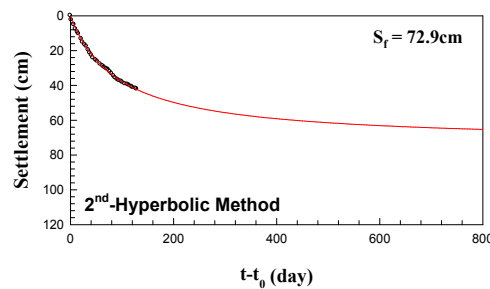
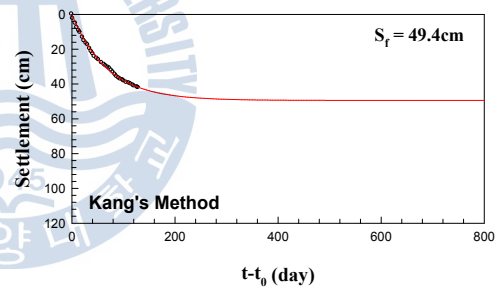
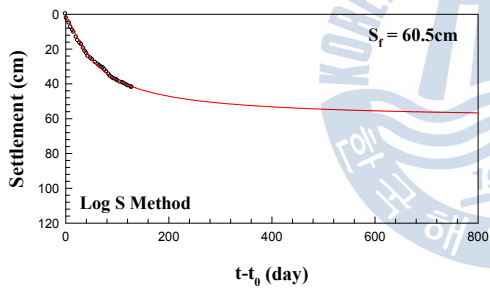
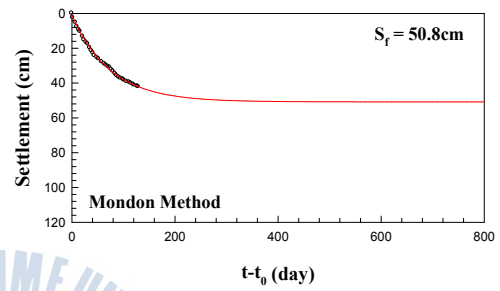
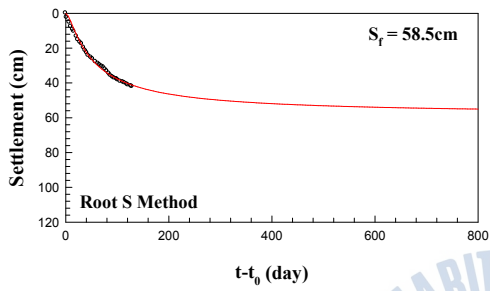
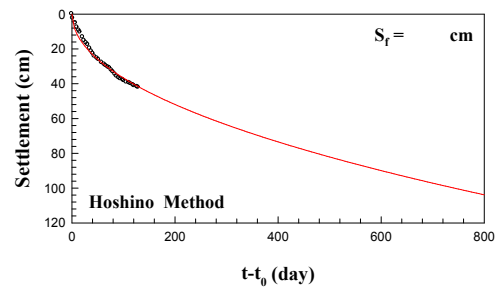
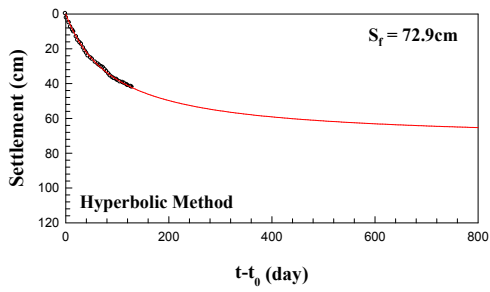
P-46 Plate

부록 G (continued)



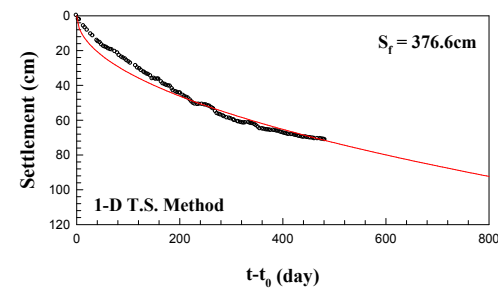
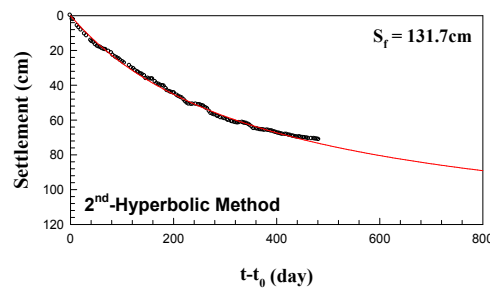
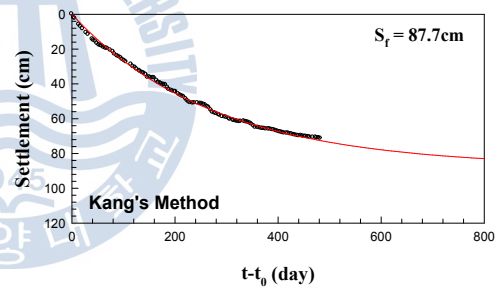
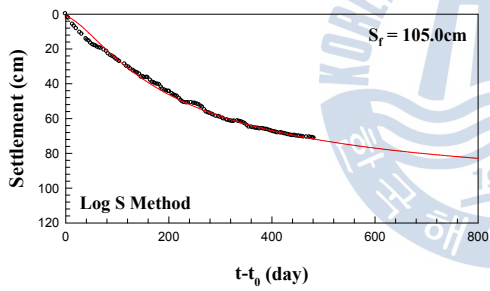
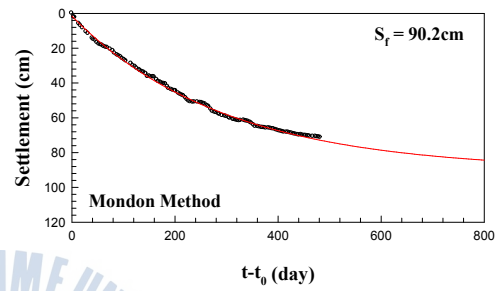
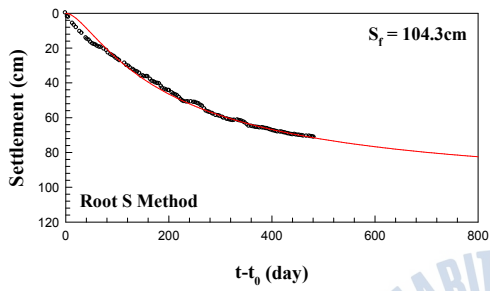
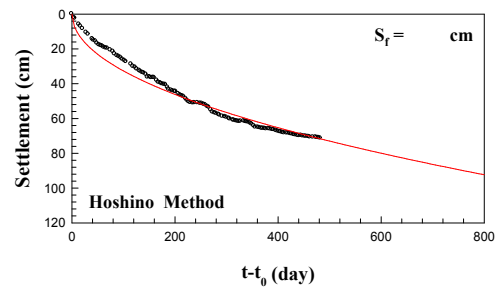
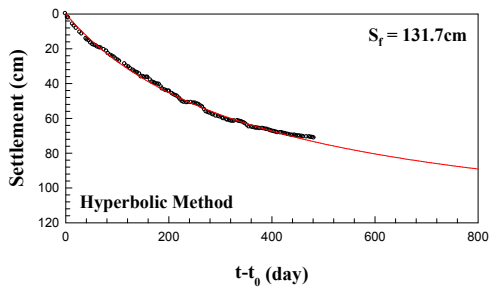
P-49 Plate

부록 G (continued)



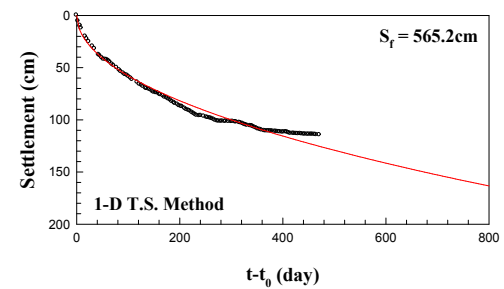
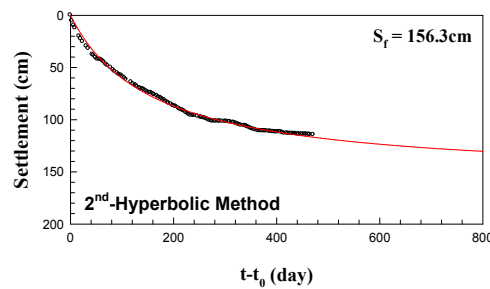
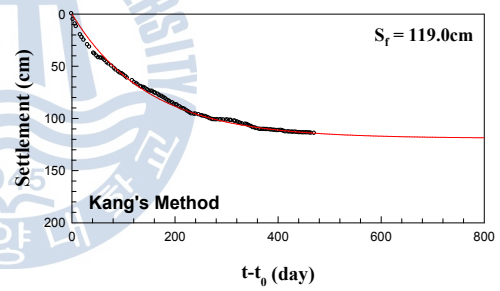
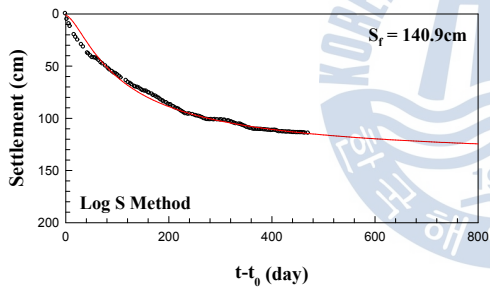
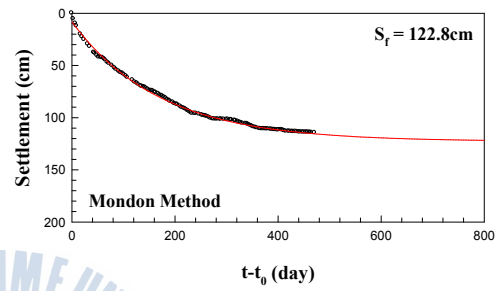
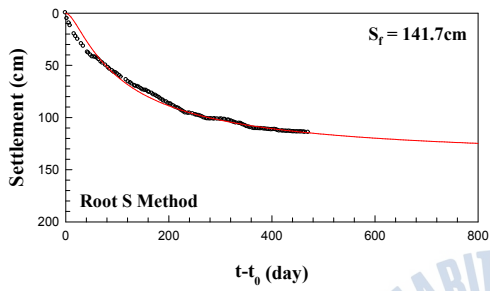
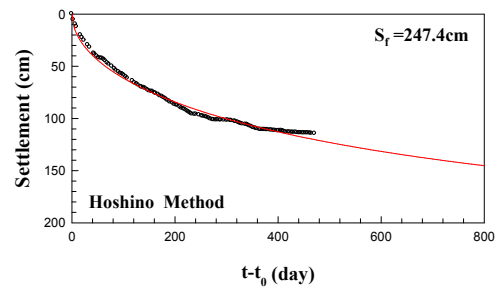
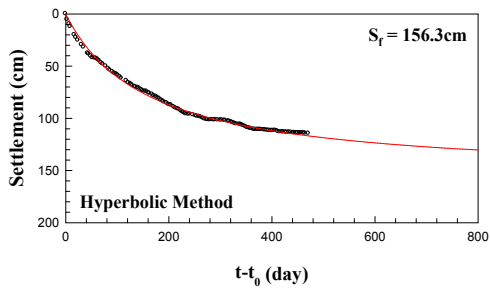
P-50 Plate

부록 G (continued)



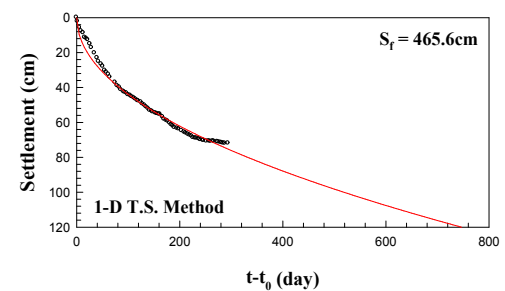
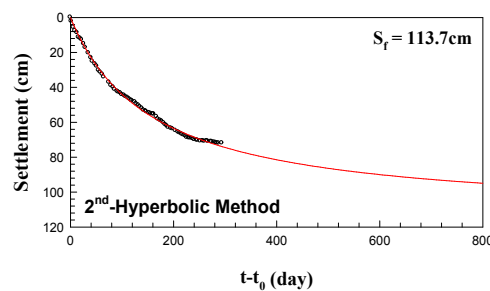
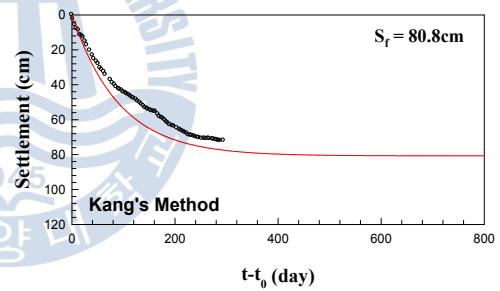
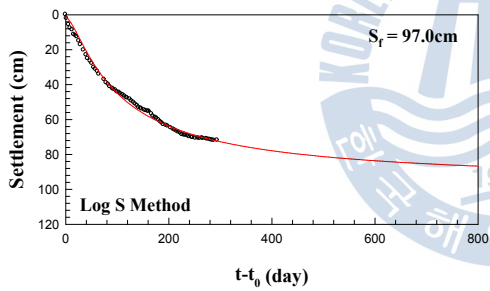
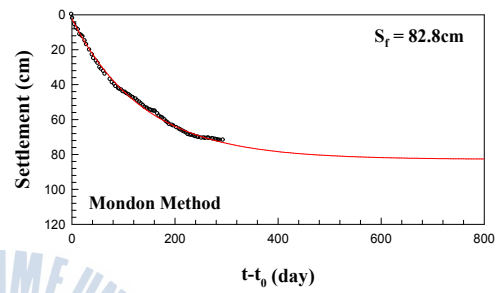
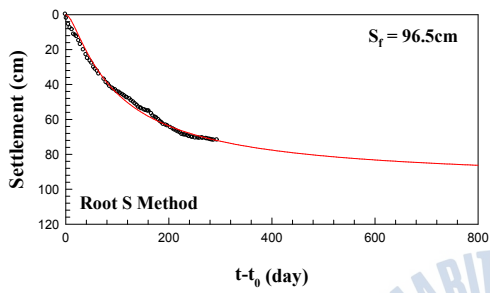
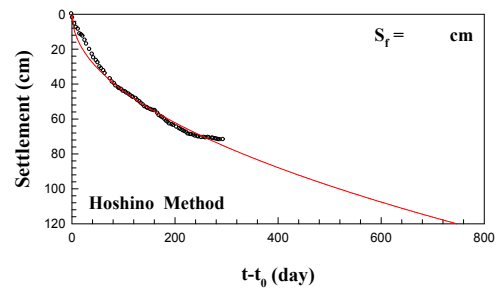
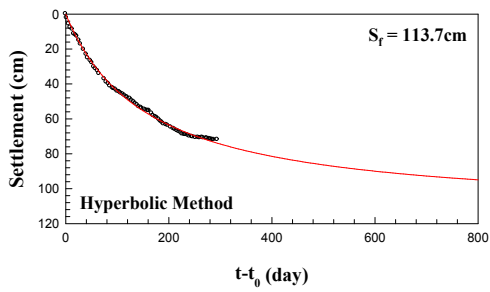
P-51 Plate

부록 G (continued)



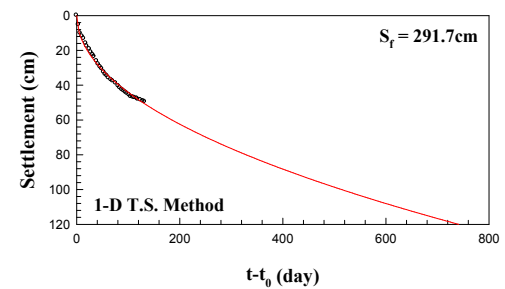
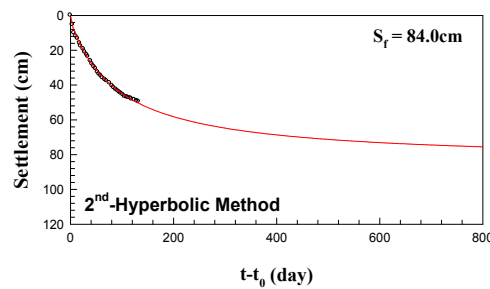
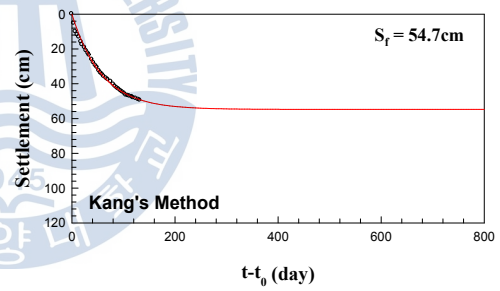
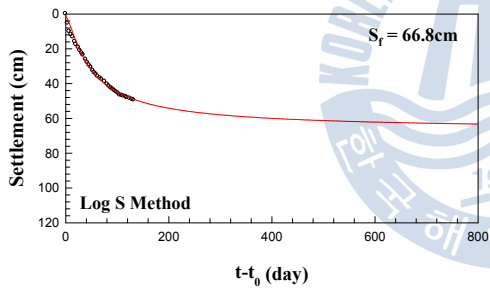
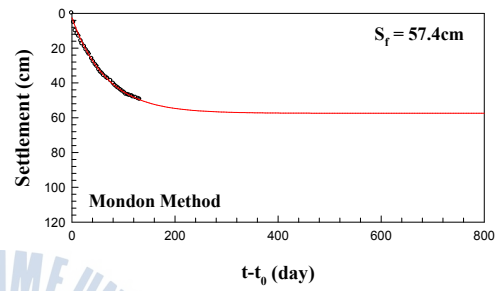
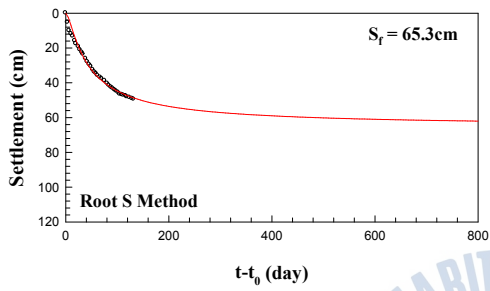
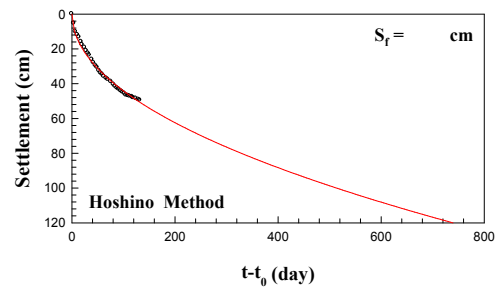
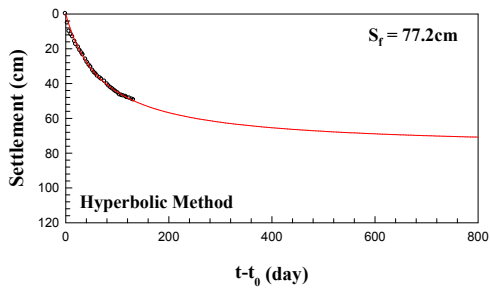
P-52 Plate

부록 G (continued)



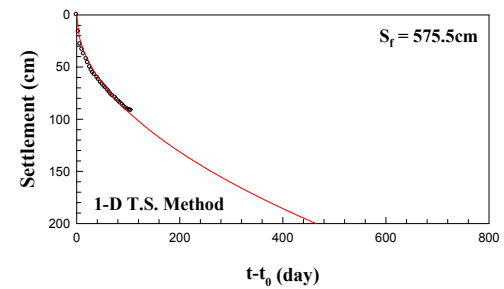
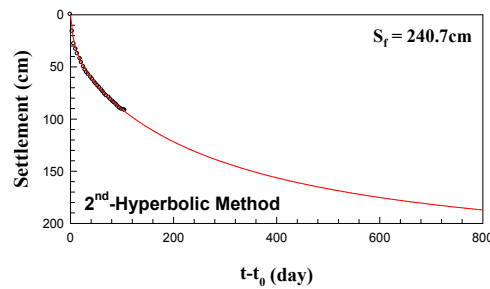
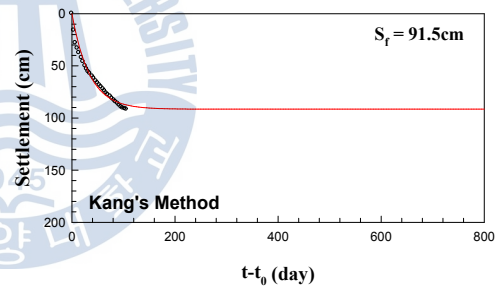
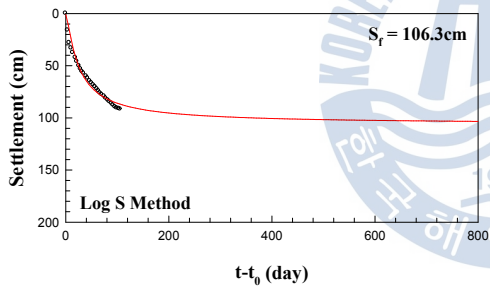
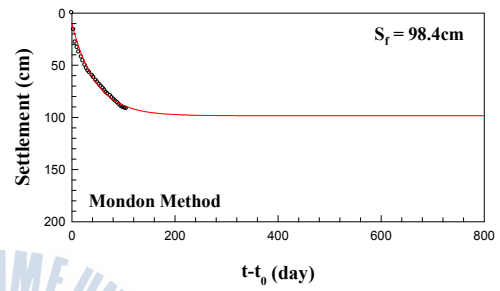
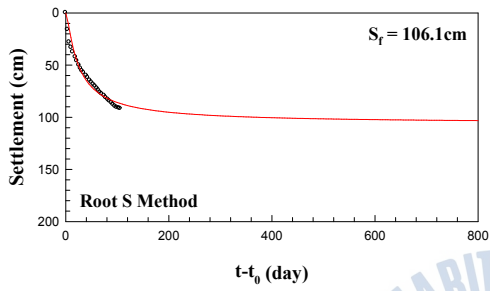
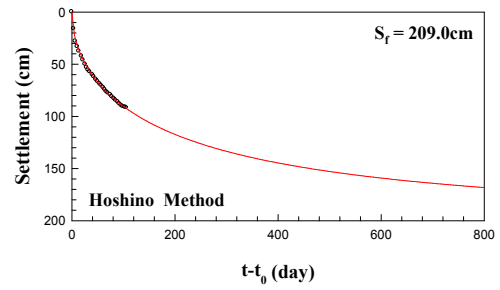
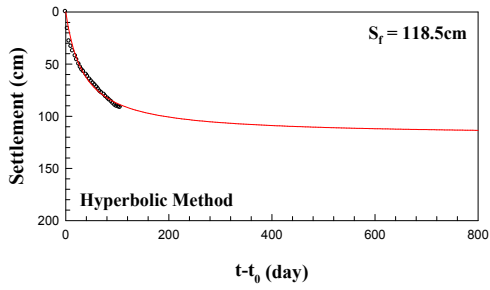
P-55 Plate

부록 G (continued)



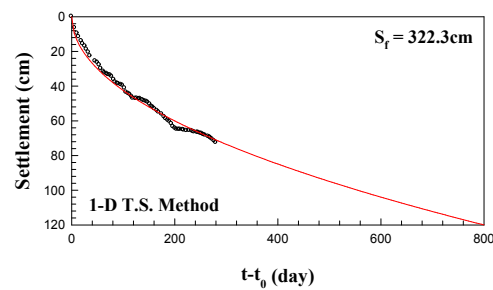
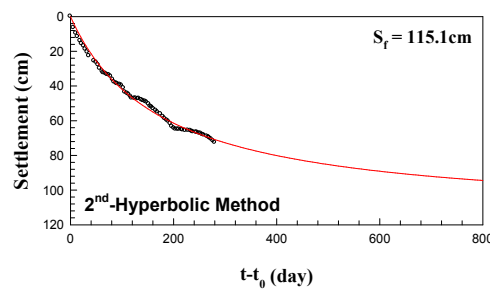
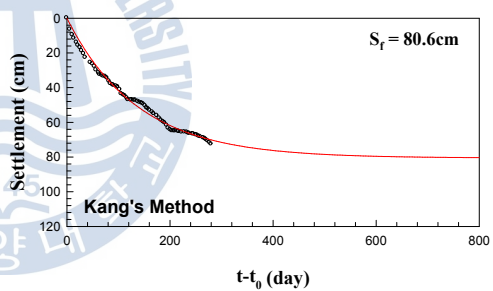
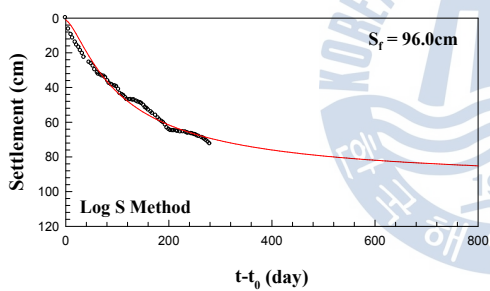
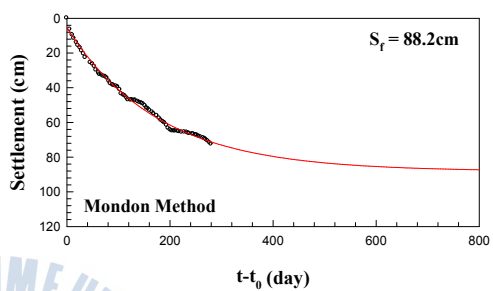
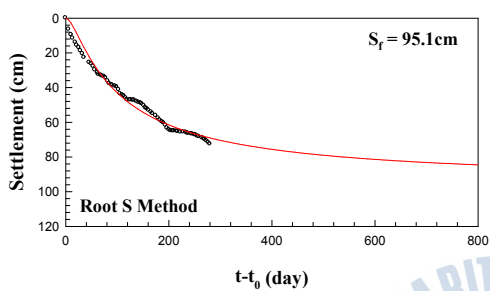
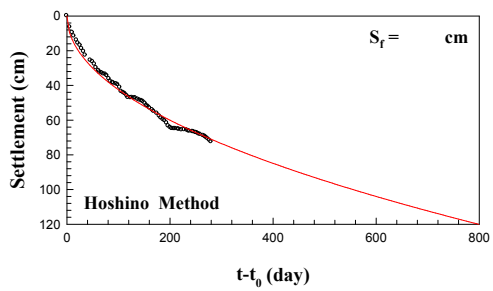
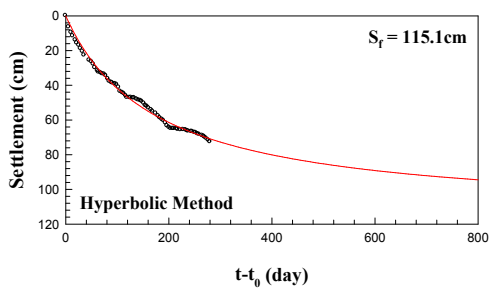
P-56 Plate

부록 G (continued)



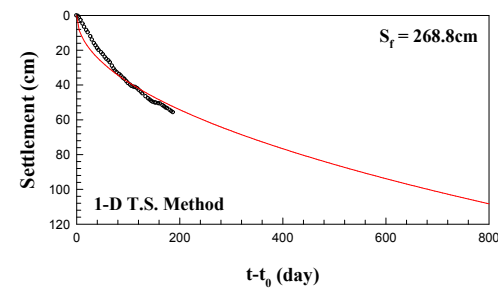
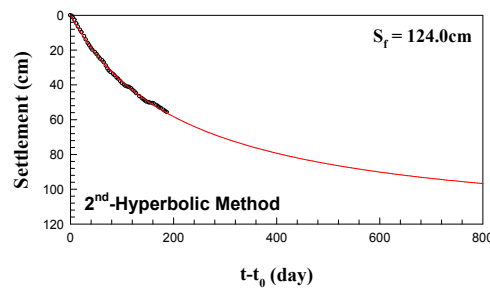
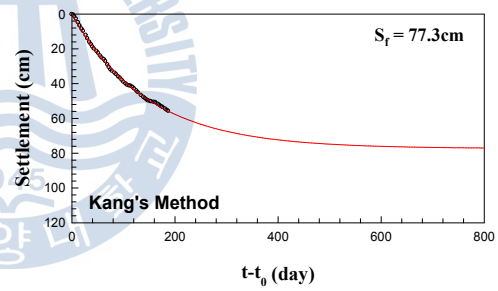
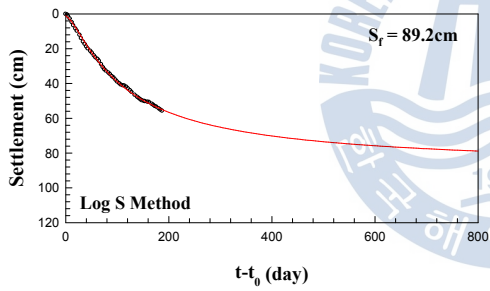
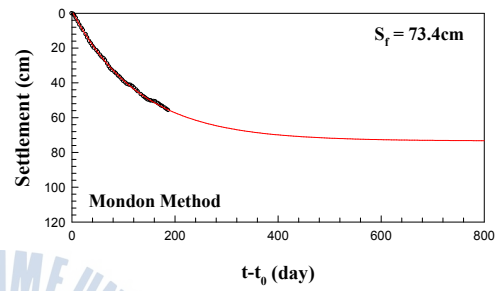
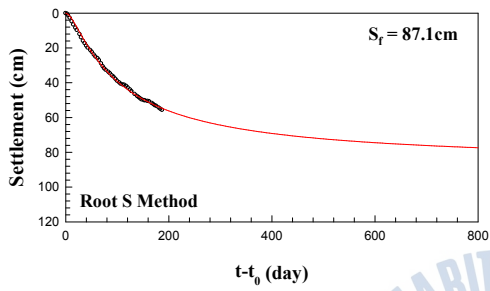
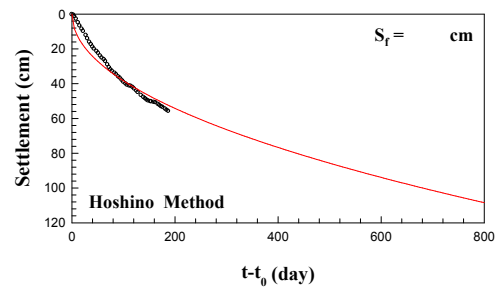
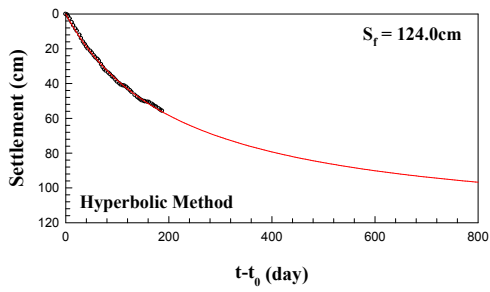
P-57 Plate

부록 G (continued)



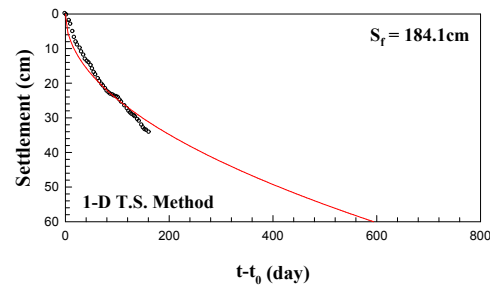
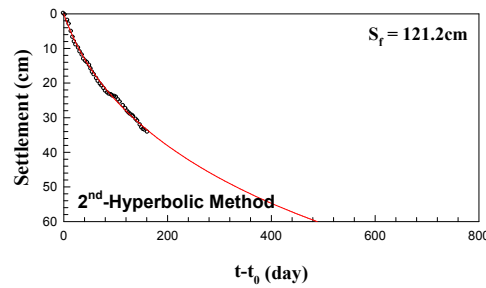
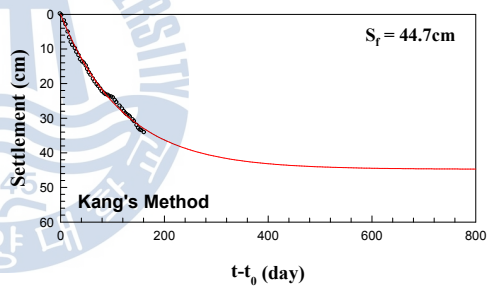
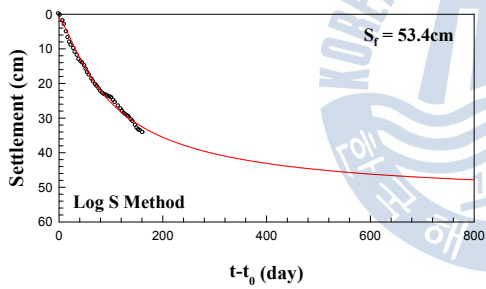
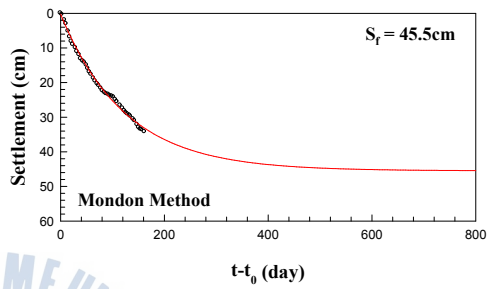
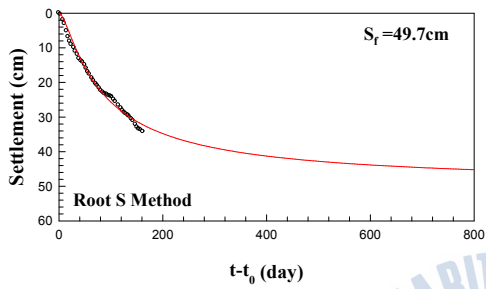
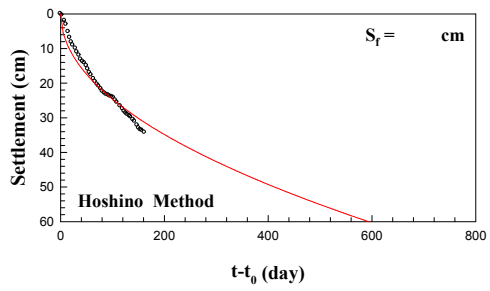
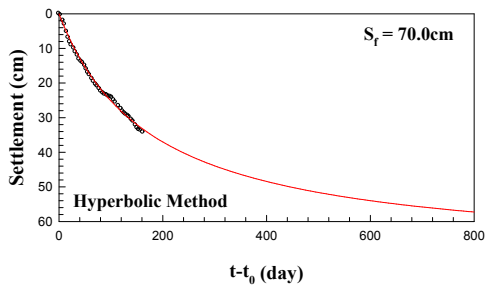
P-60 Plate

부록 G (continued)



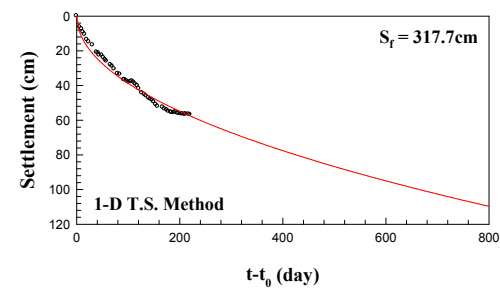
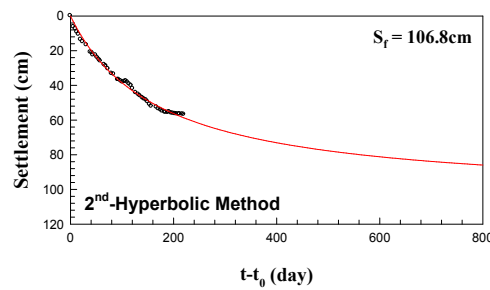
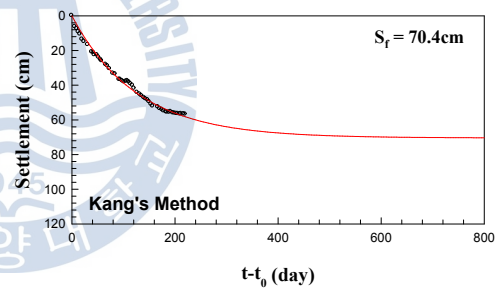
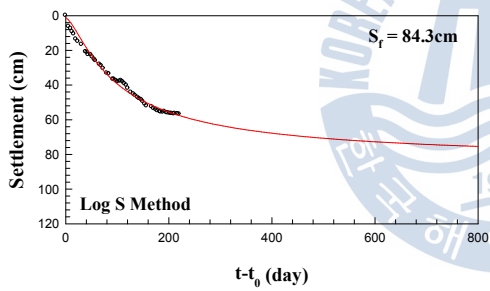
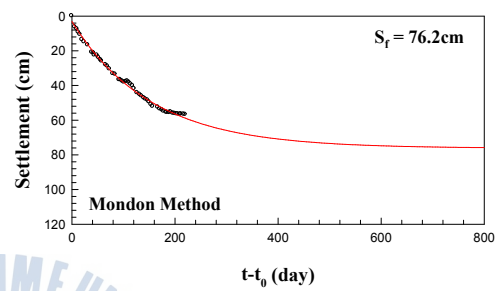
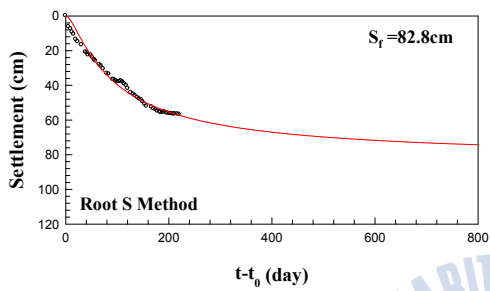
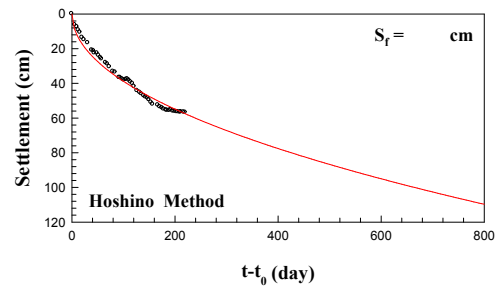
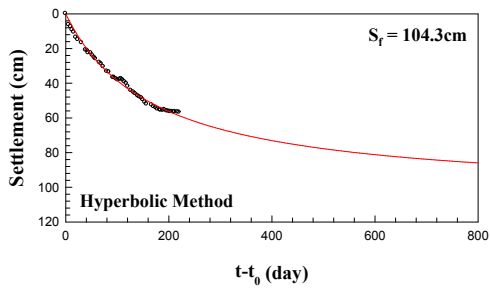
P-61 Plate

부록 G (continued)



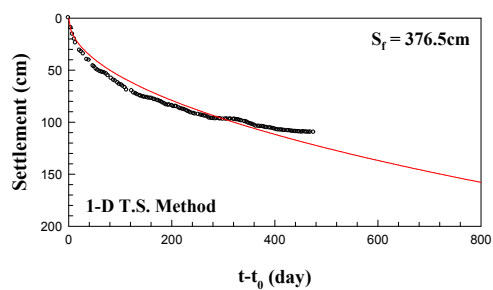
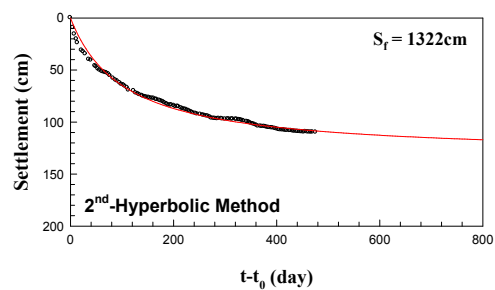
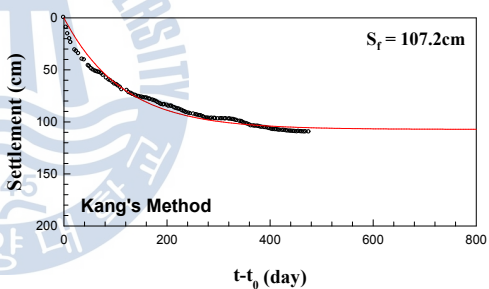
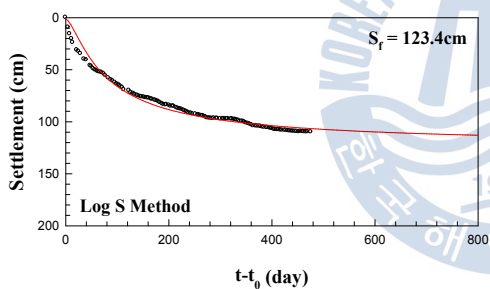
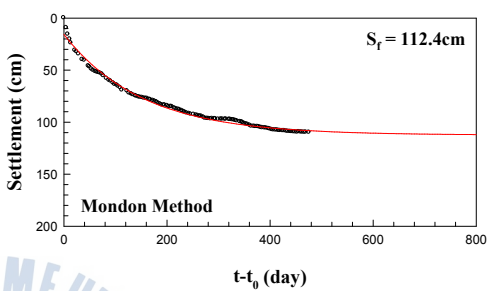
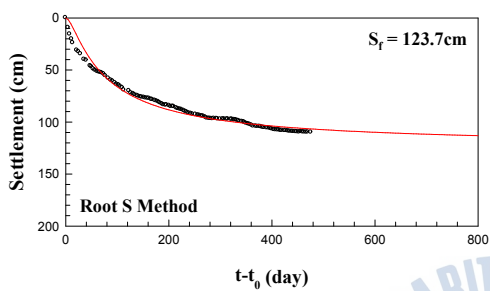
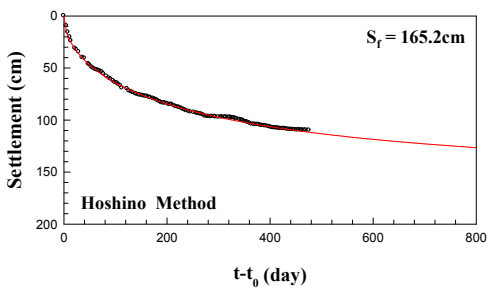
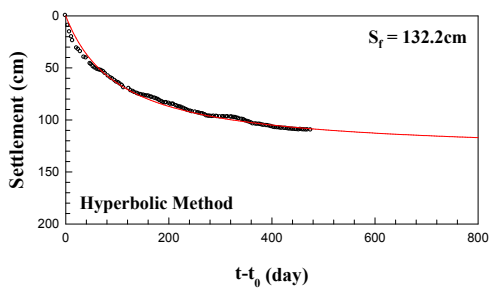
P-62 Plate

부록 G (continued)



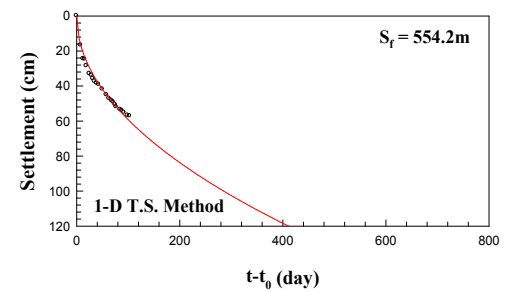
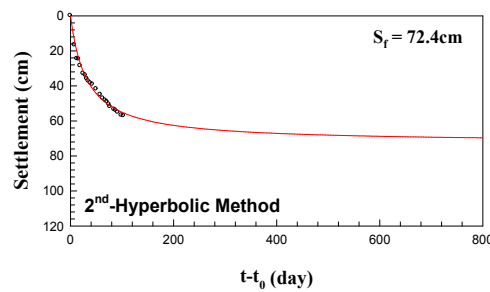
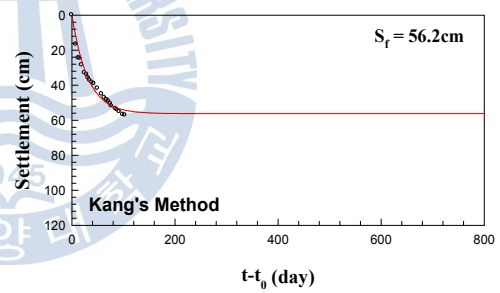
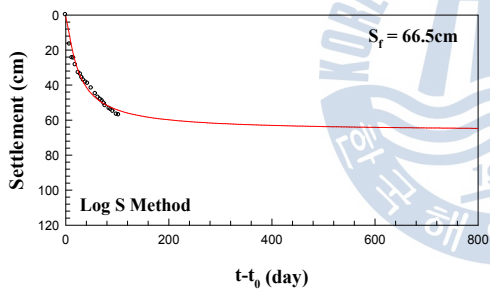
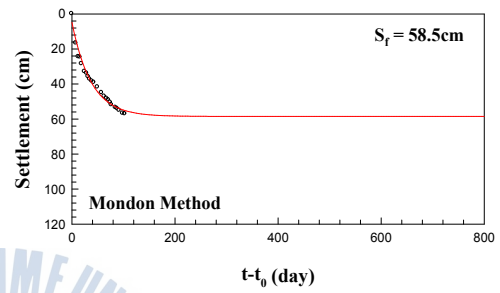
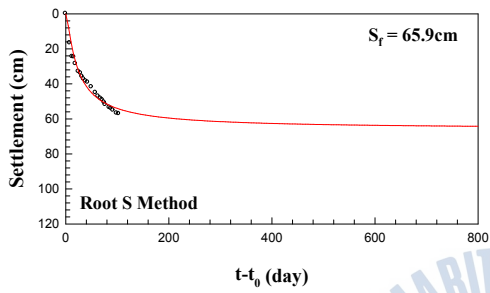
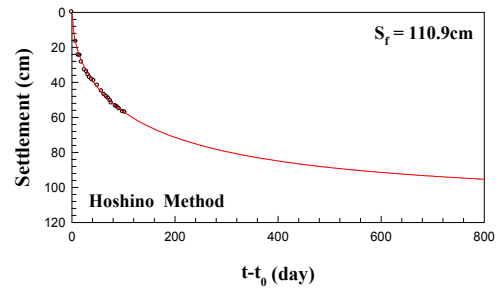
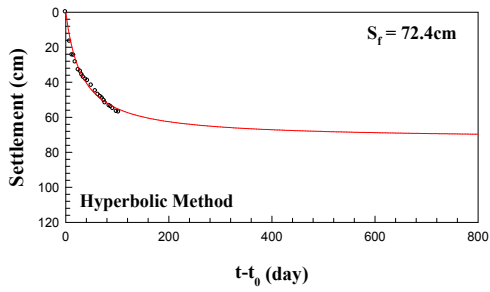
P-63 Plate

부록 G (continued)



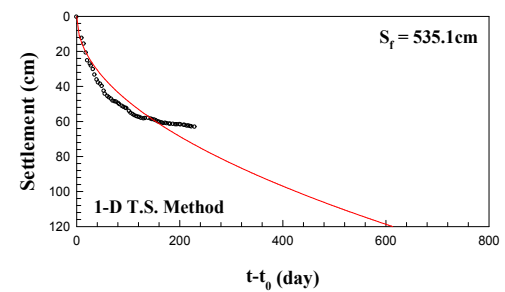
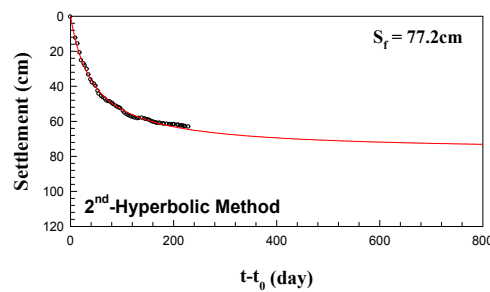
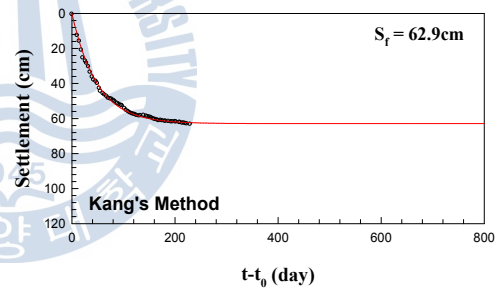
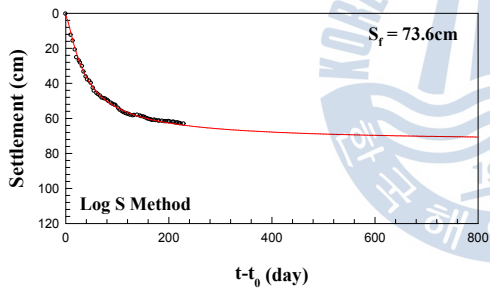
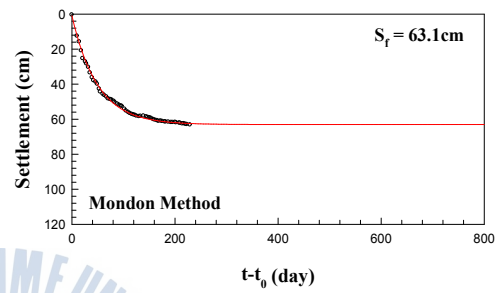
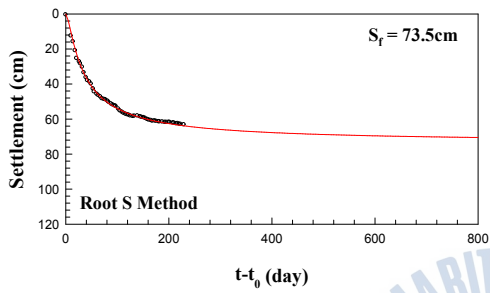
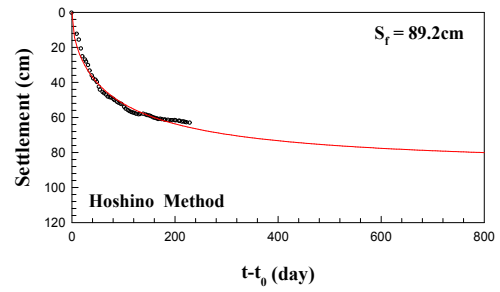
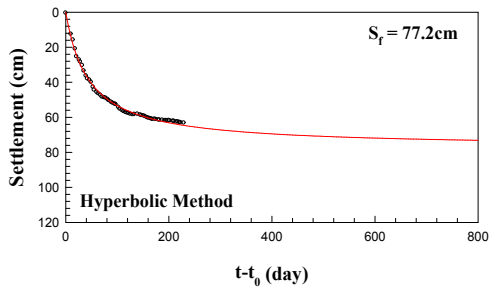
P-64 Plate

부록 G (continued)



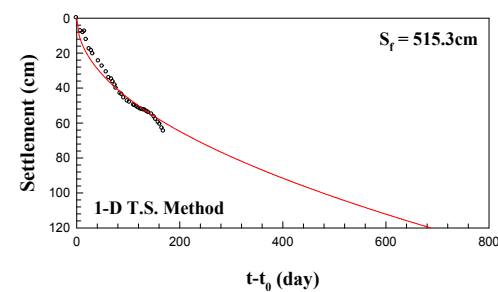
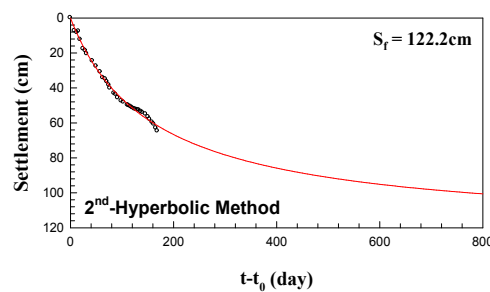
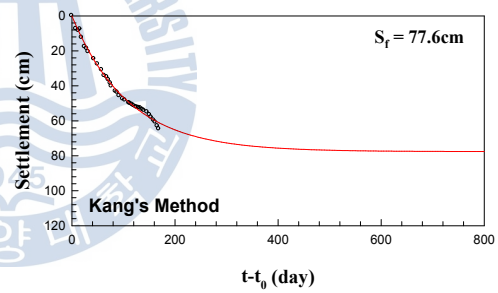
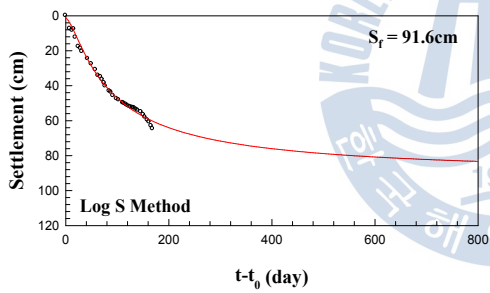
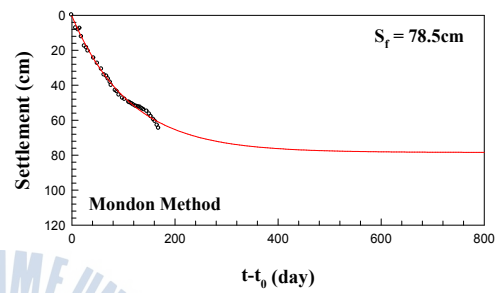
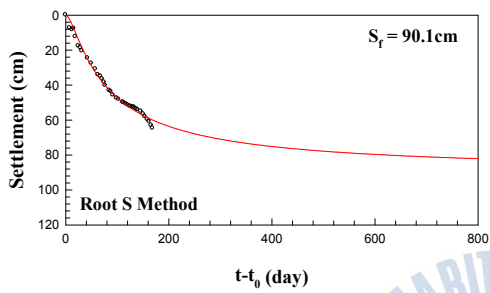
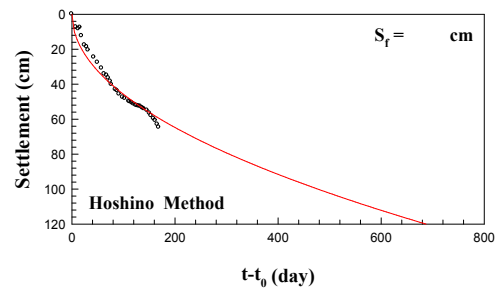
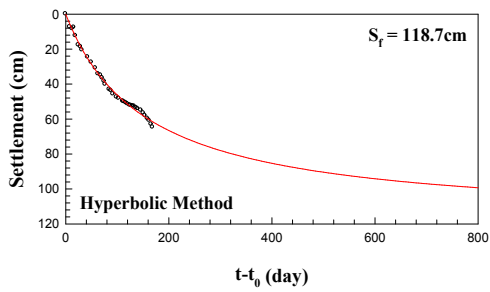
SP-1 Plate

부록 G (continued)



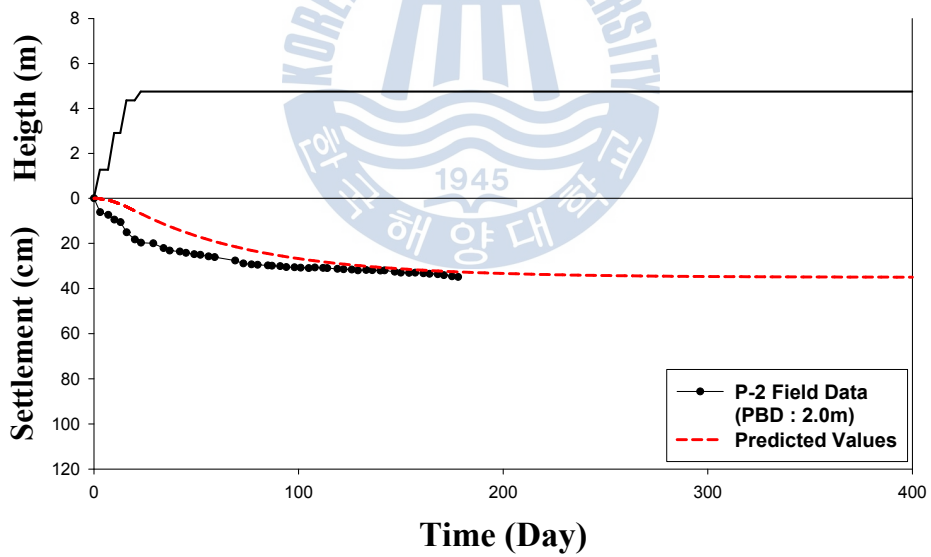
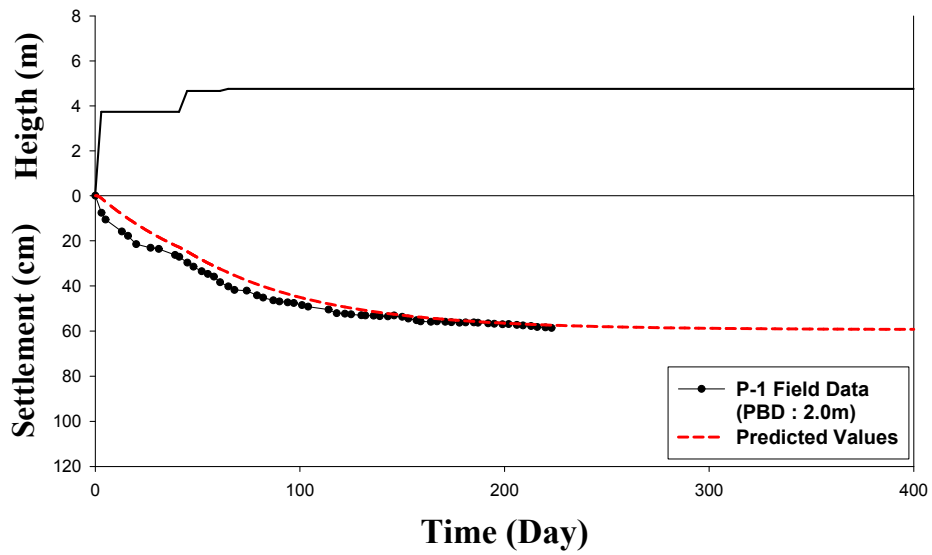
SP-2 Plate

부록 G (continued)

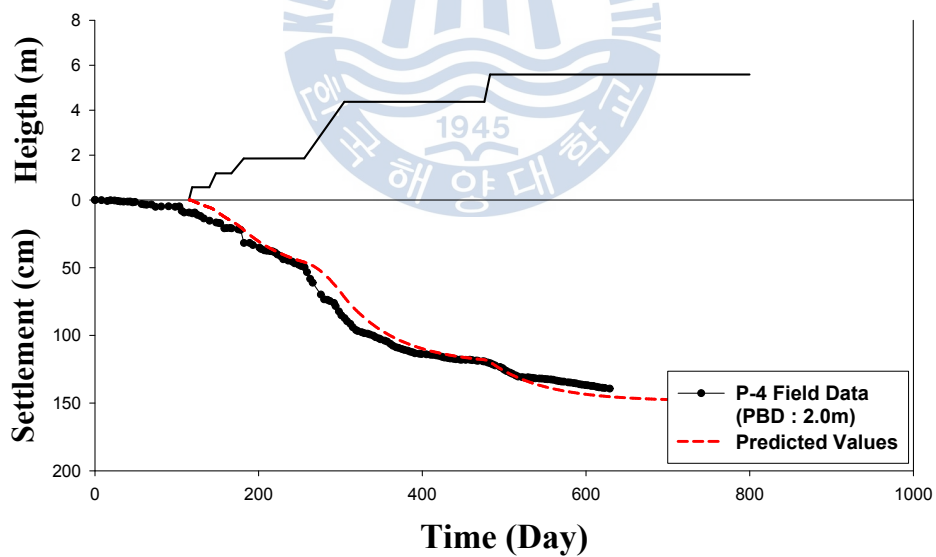
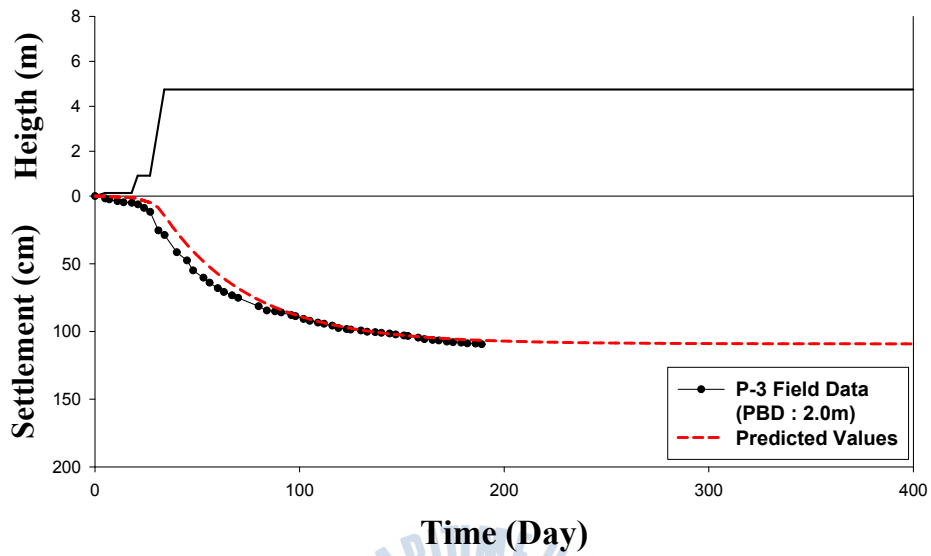


SP-3 Plate

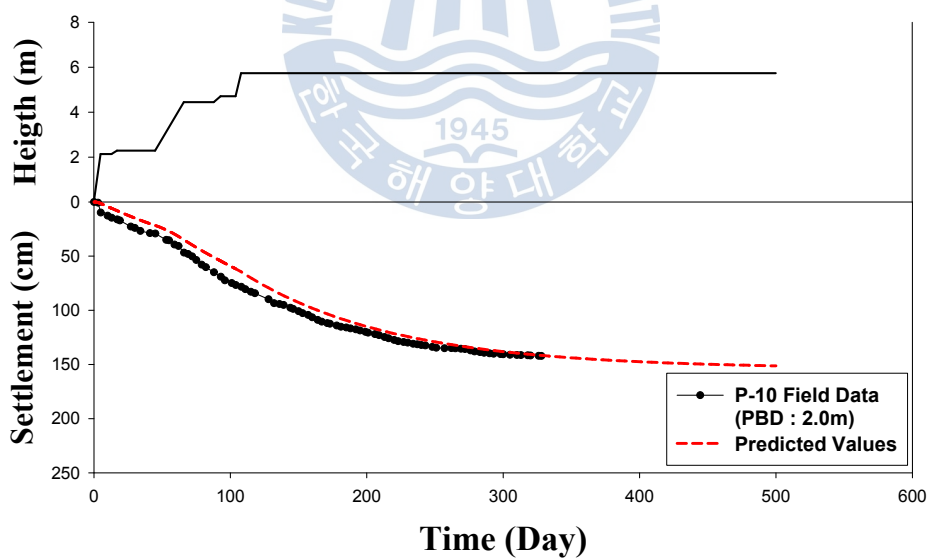
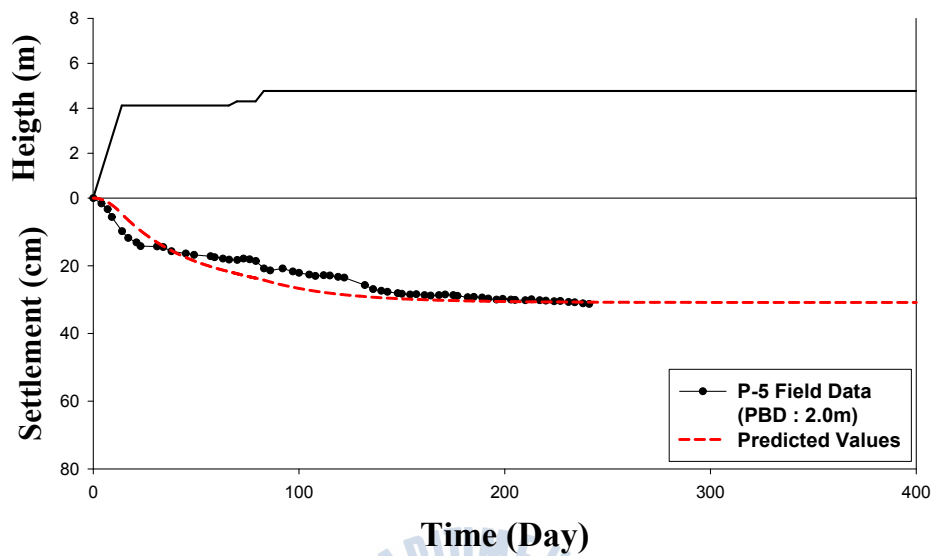
부록 G (continued)



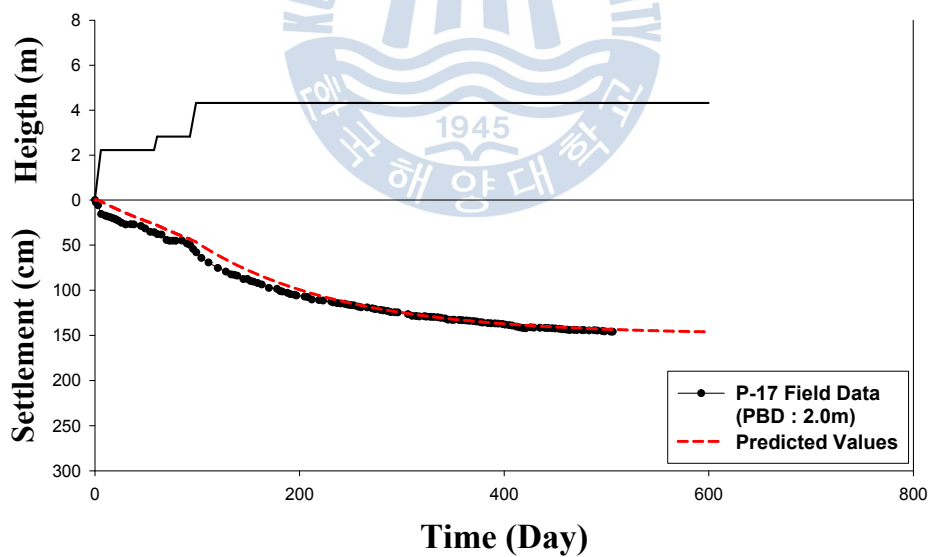
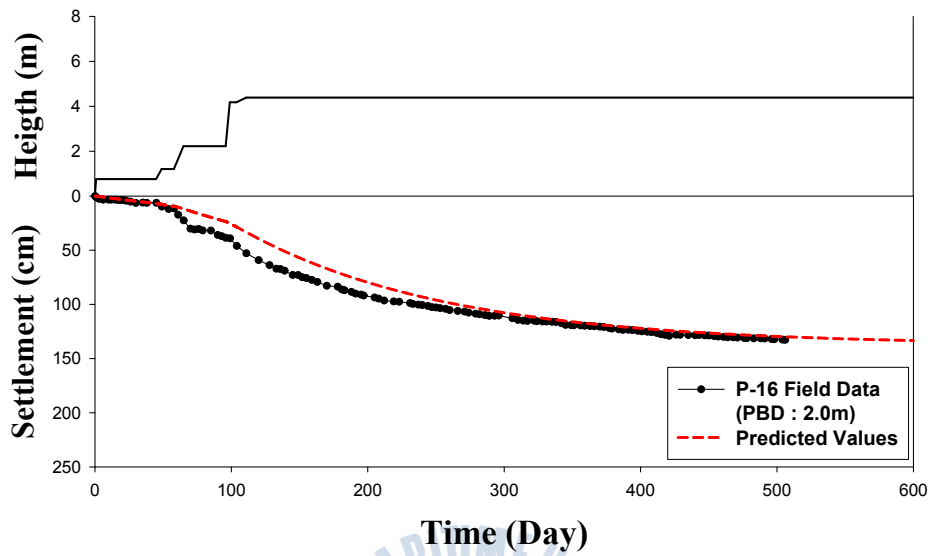
부록 H



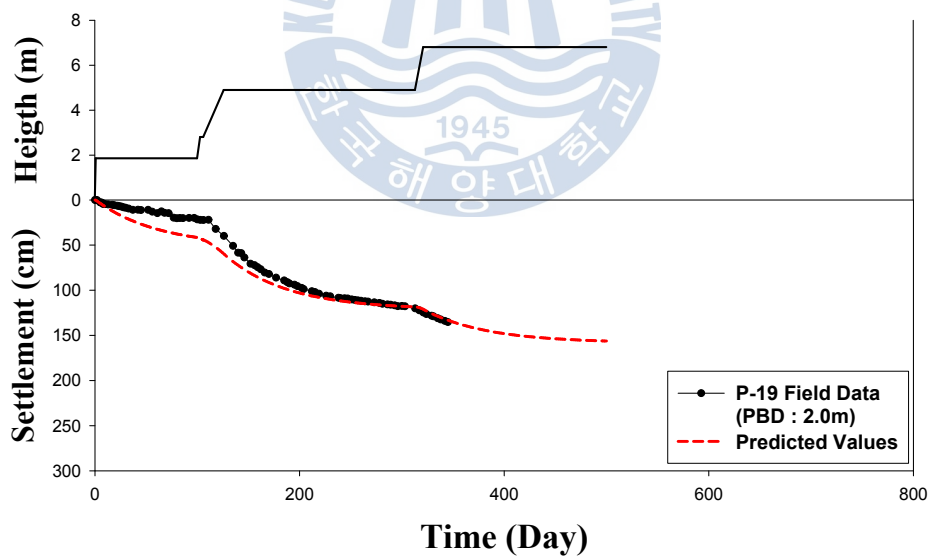
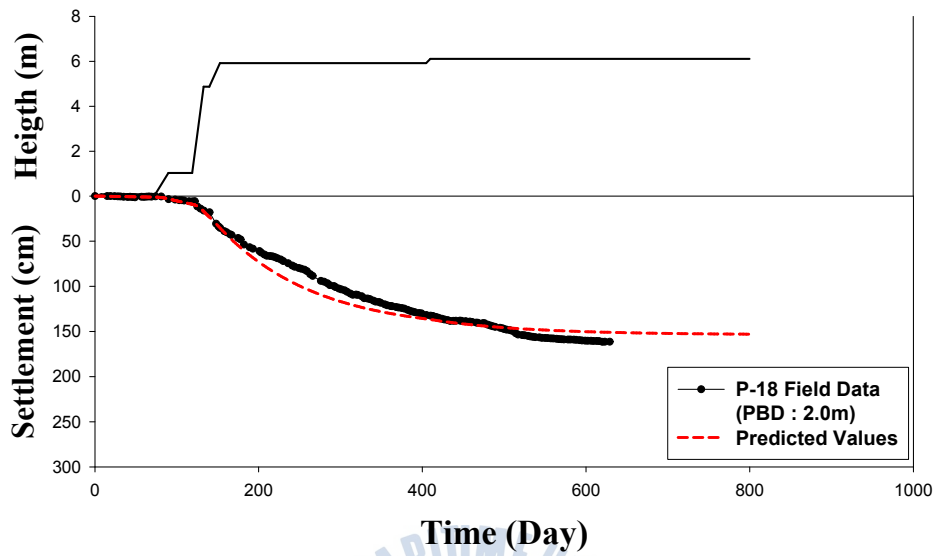
부록 H (continued)



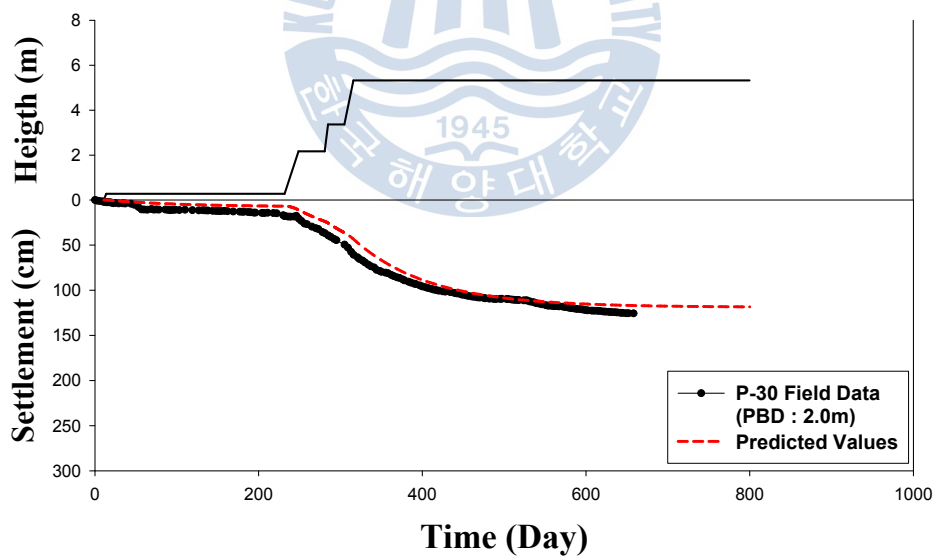
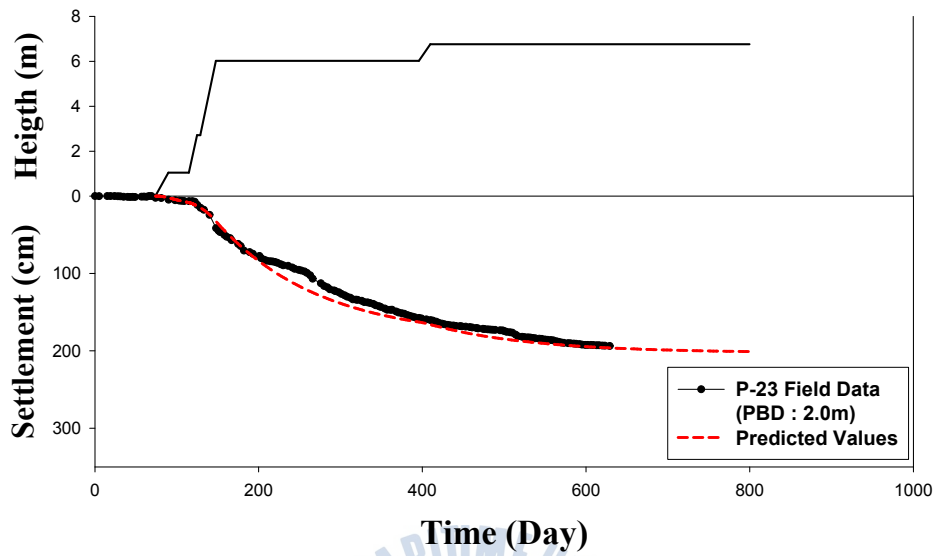
부록 H (continued)



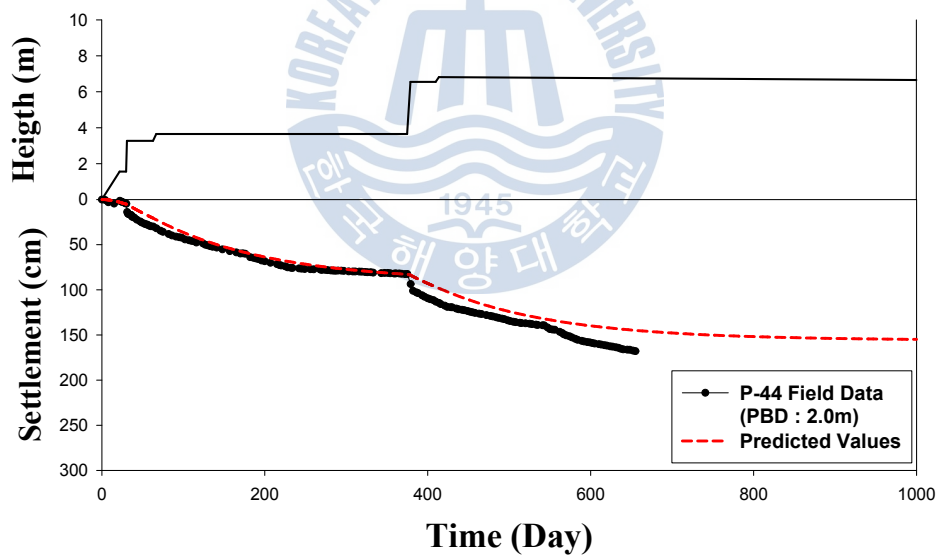
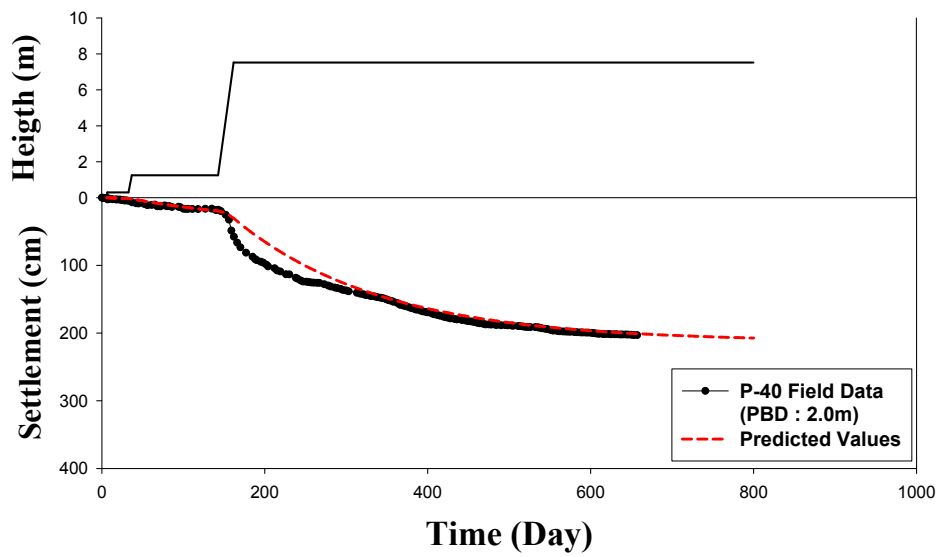
부록 H (continued)



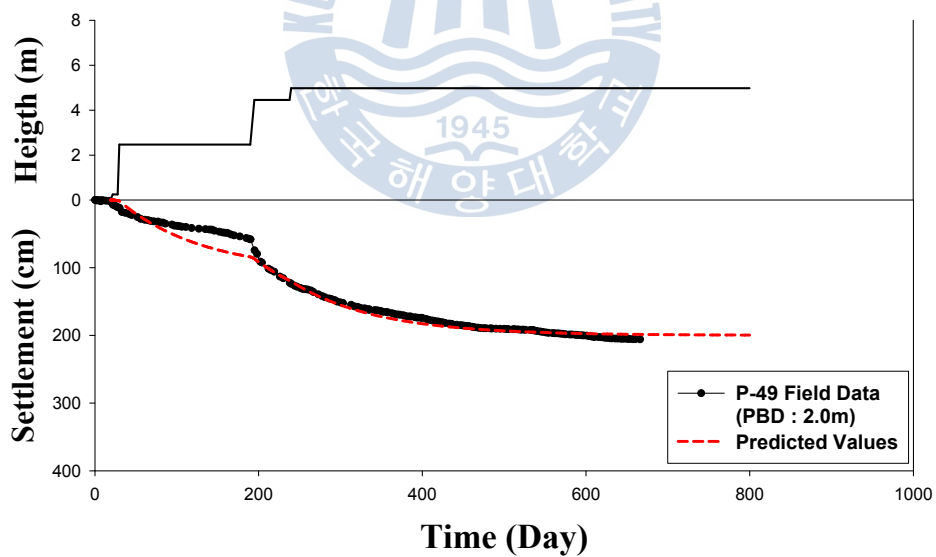
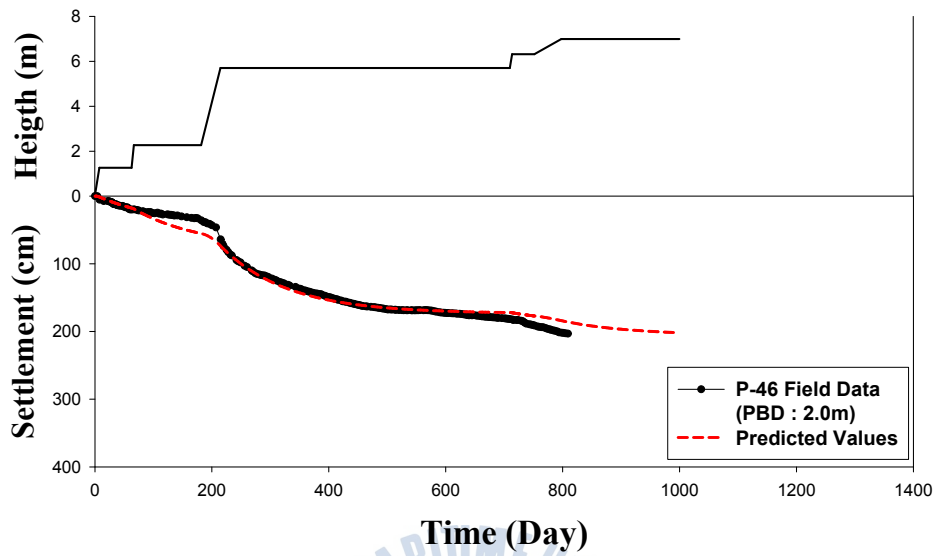
부록 H (continued)



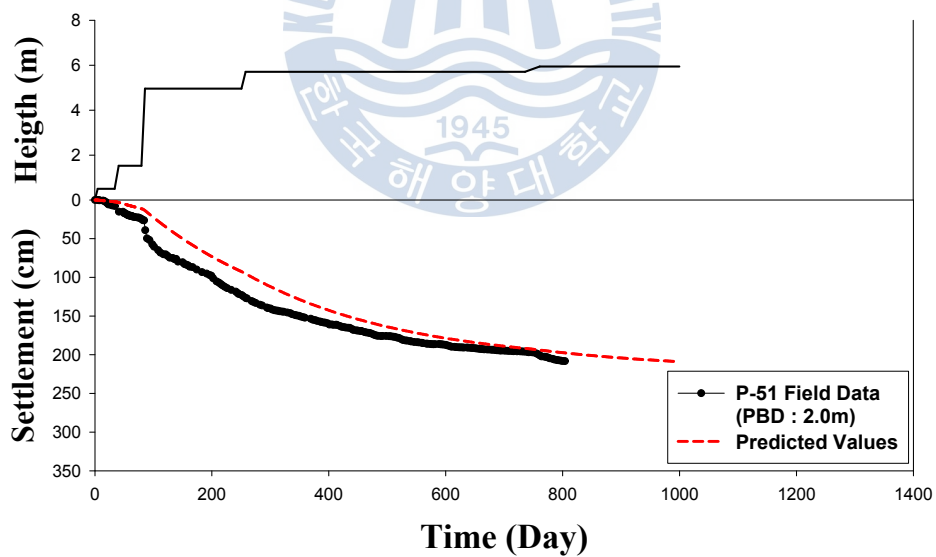
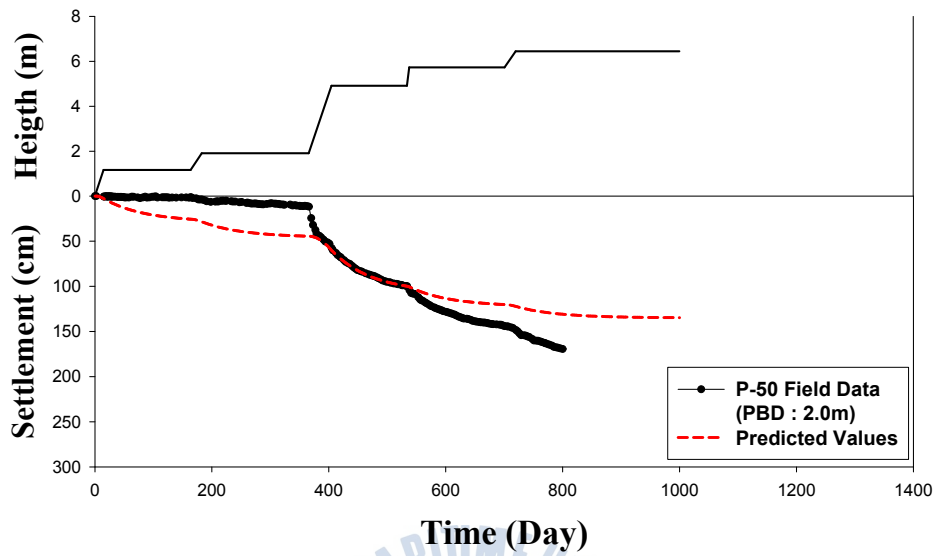
부록 H (continued)



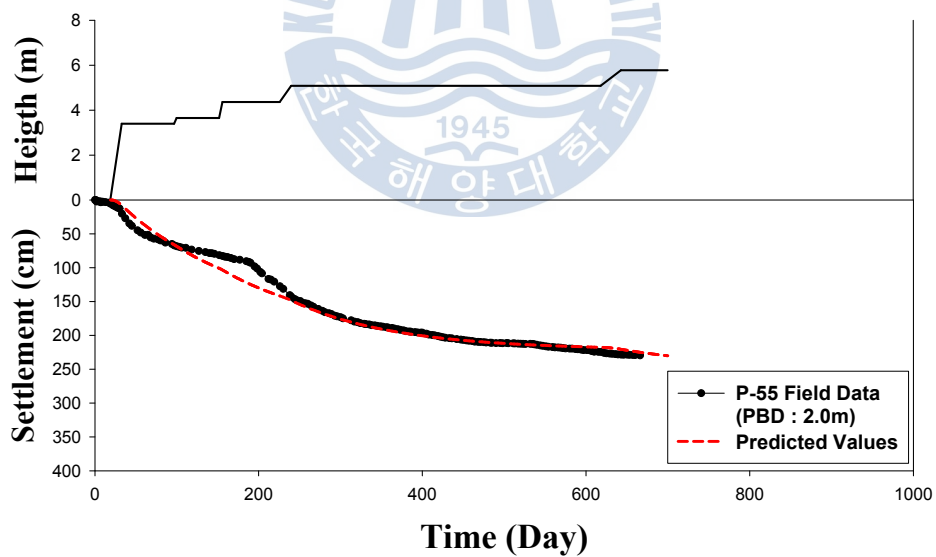
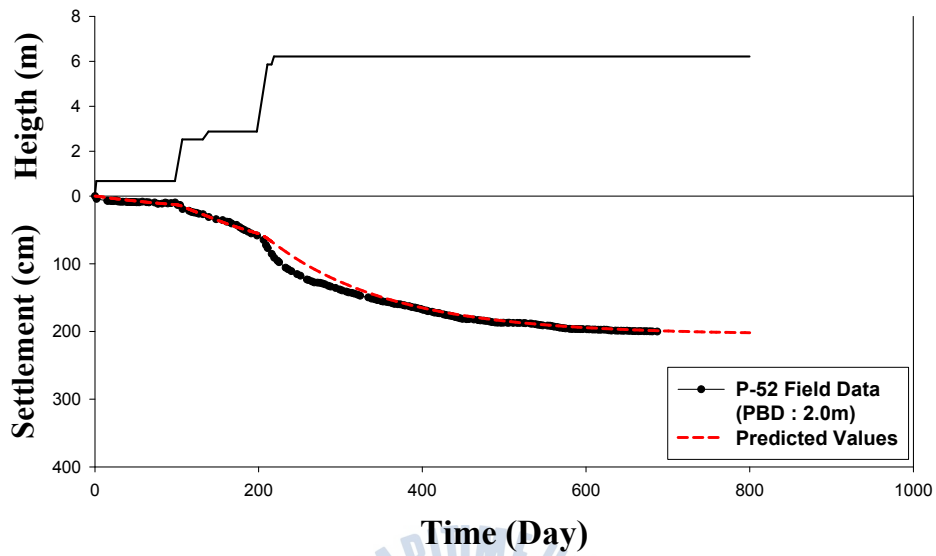
부록 H (continued)



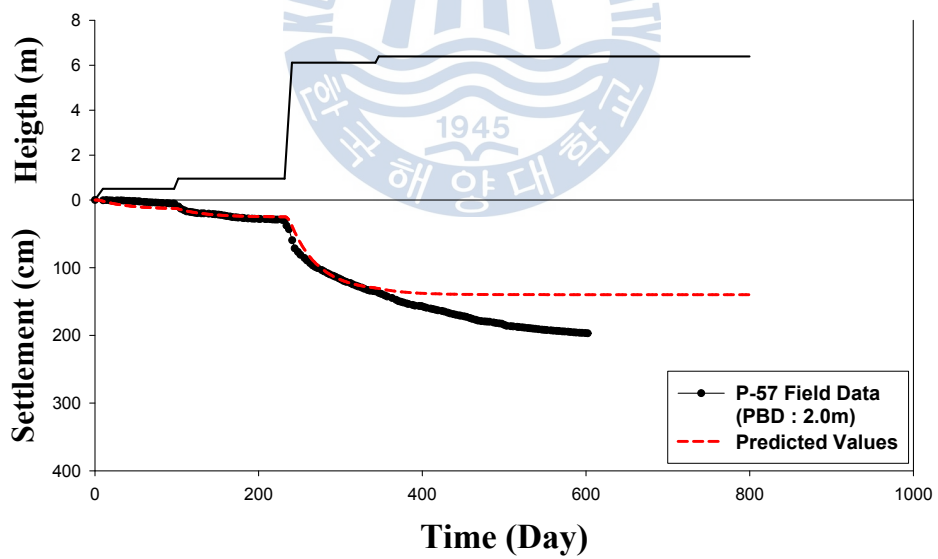
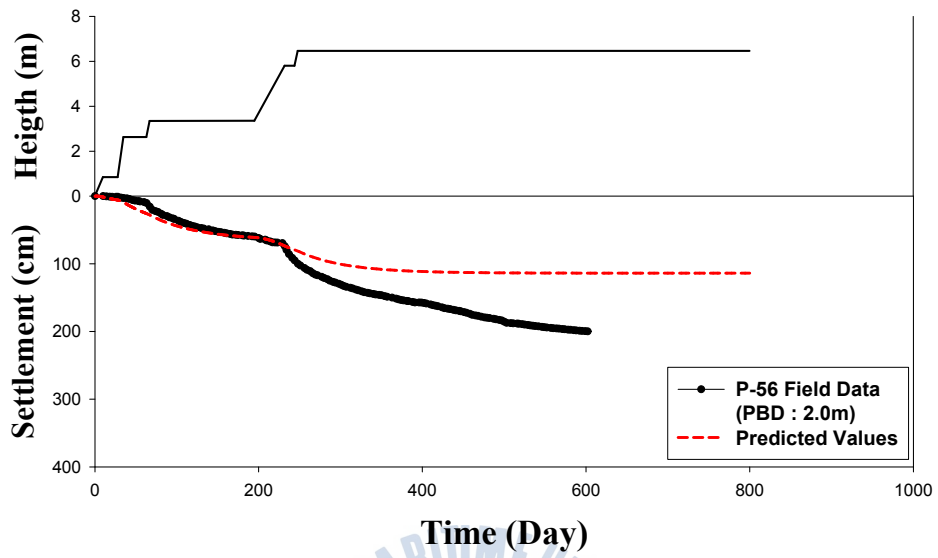
부록 H (continued)



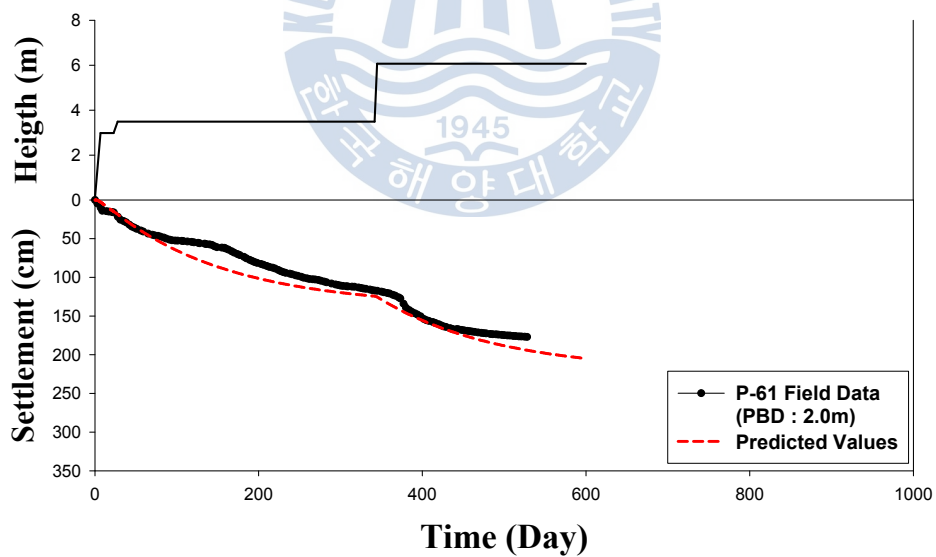
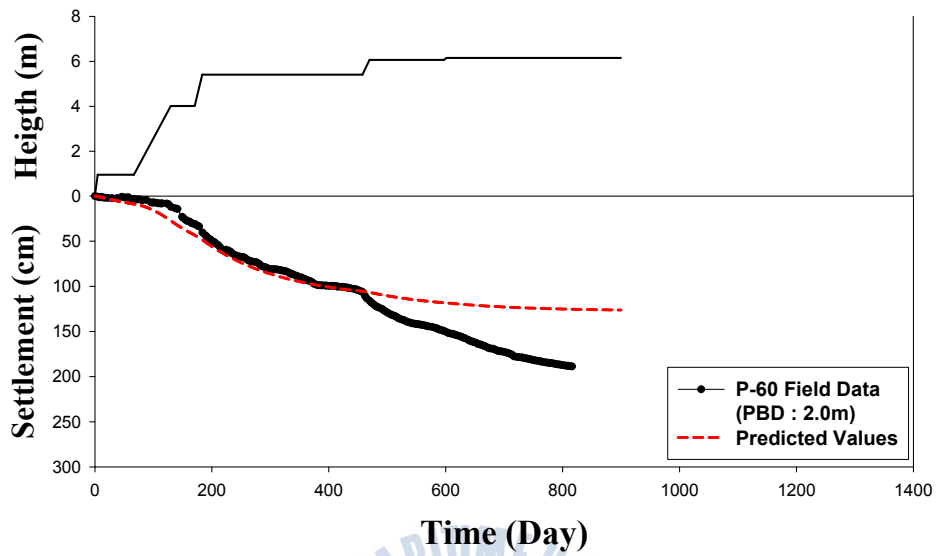
부록 H (continued)



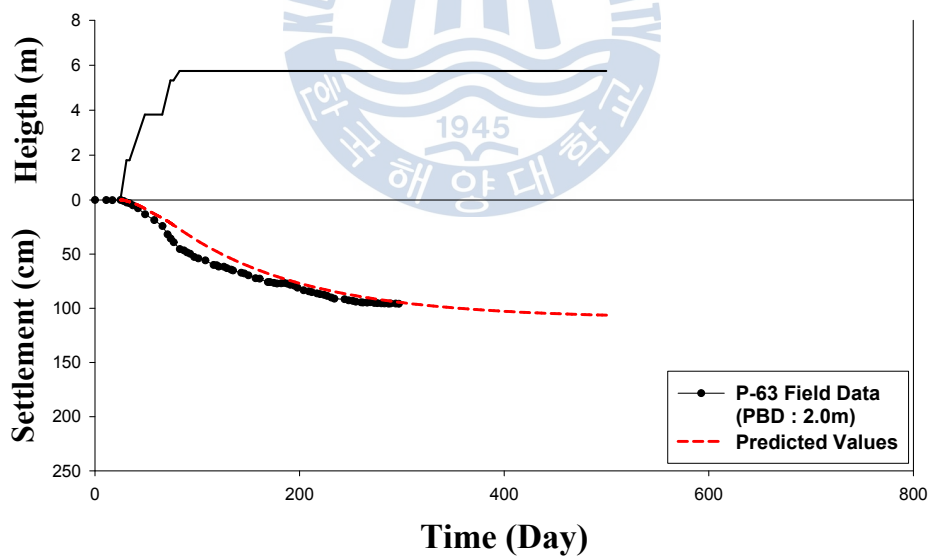
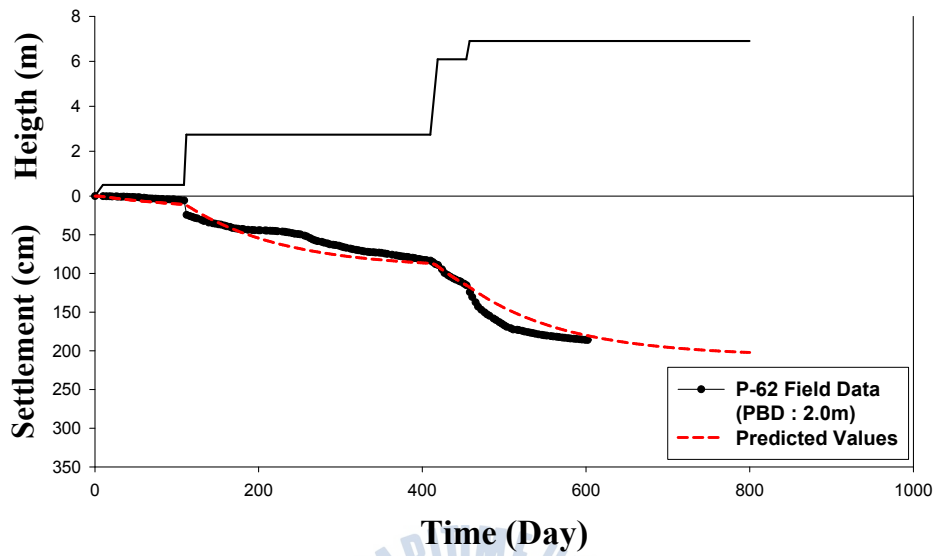
부록 H (continued)



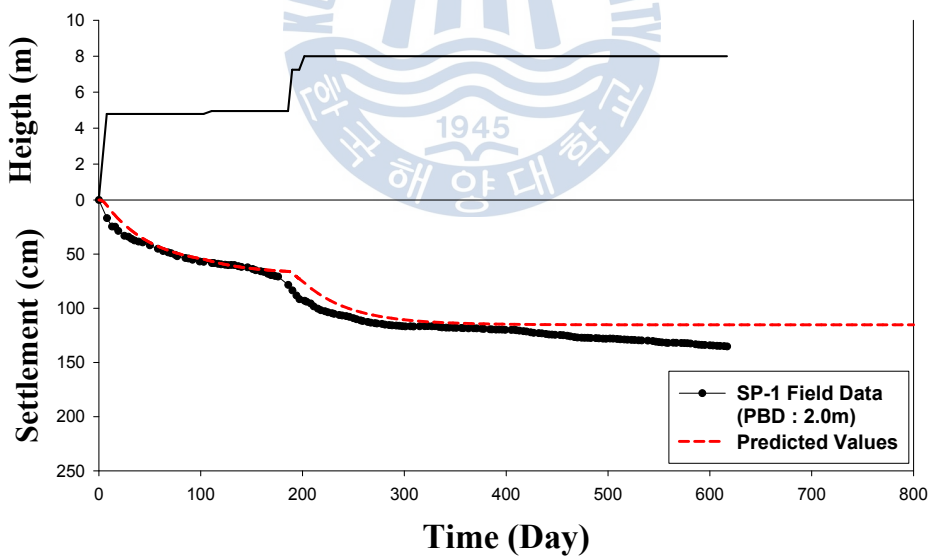
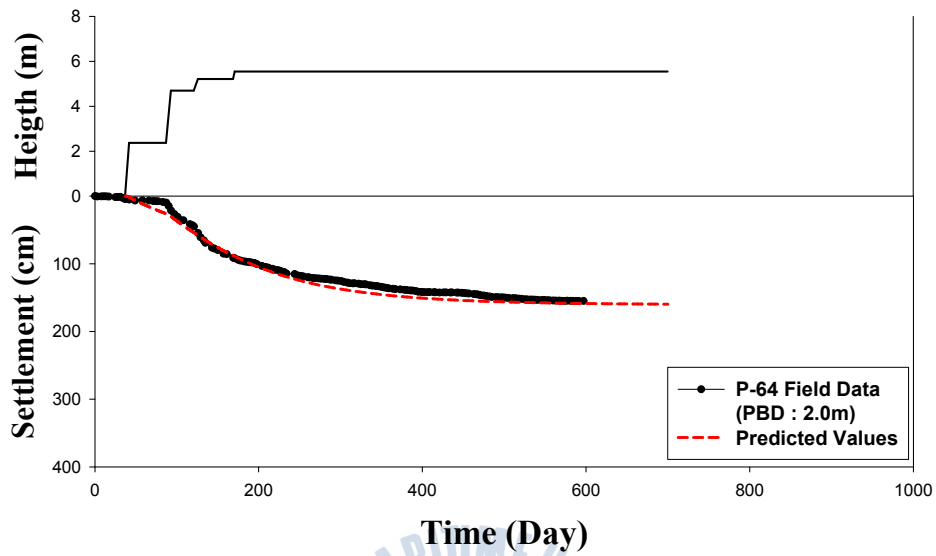
부록 H (continued)



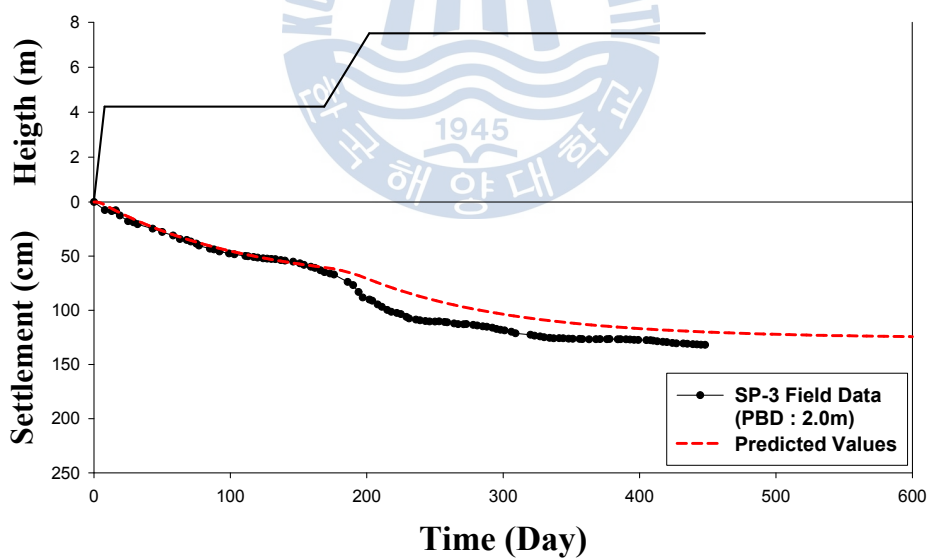
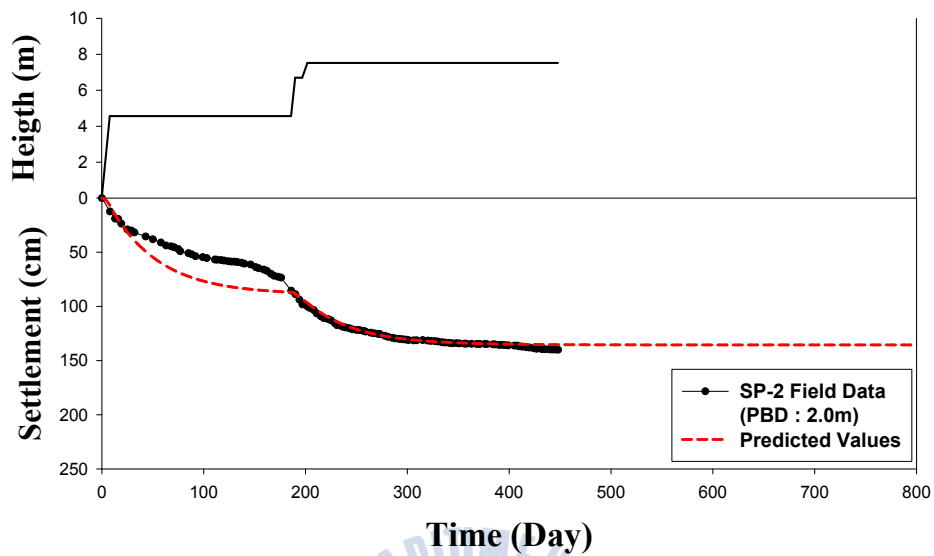
부록 H (continued)



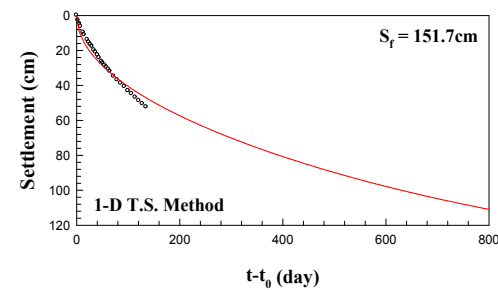
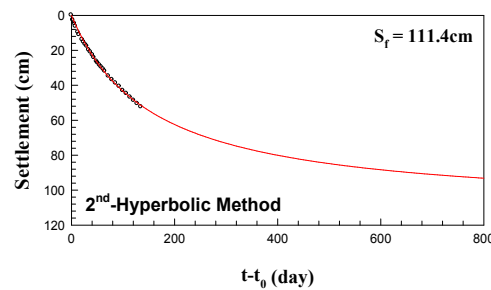
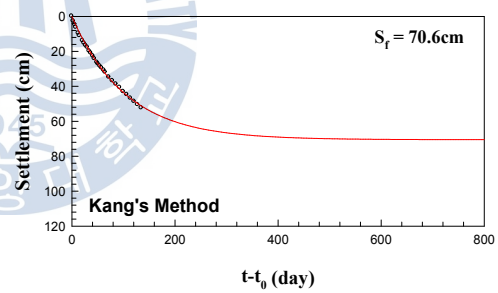
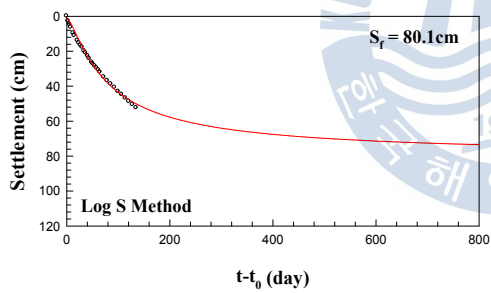
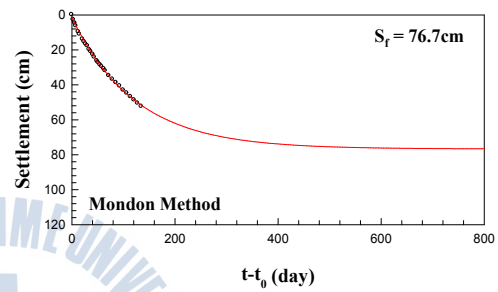
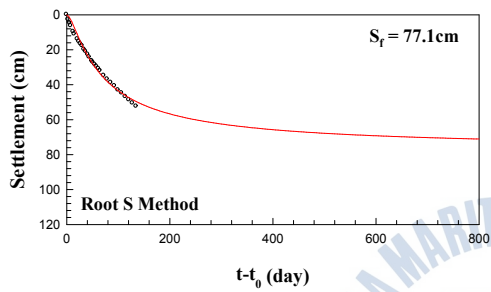
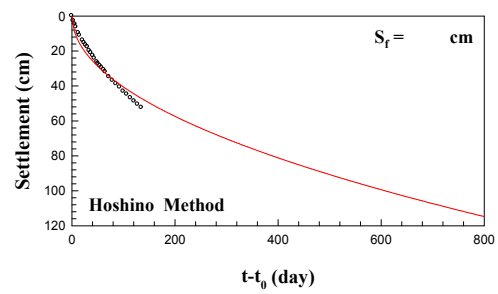
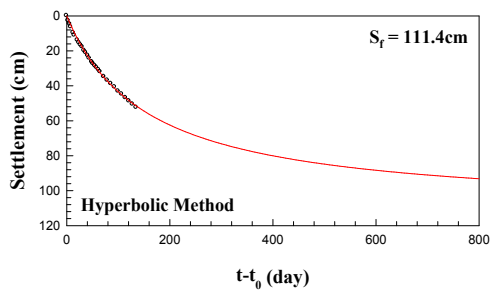
부록 H (continued)



부록 H (continued)

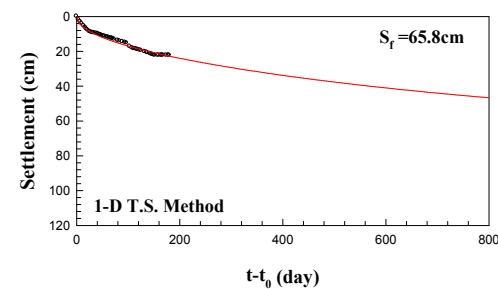
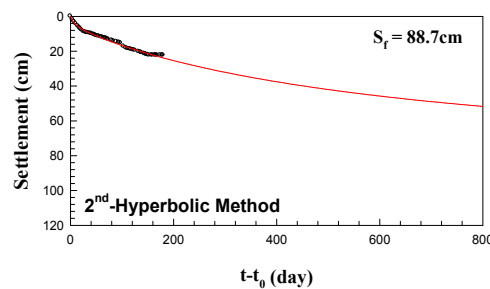
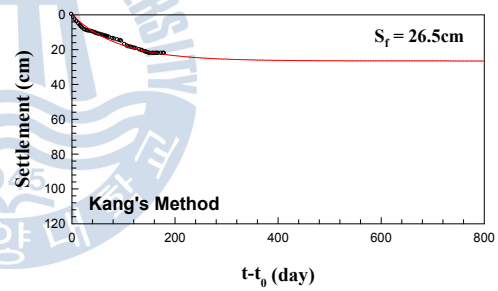
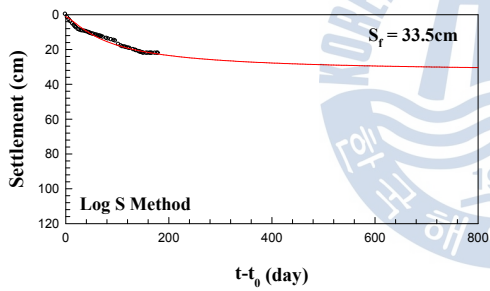
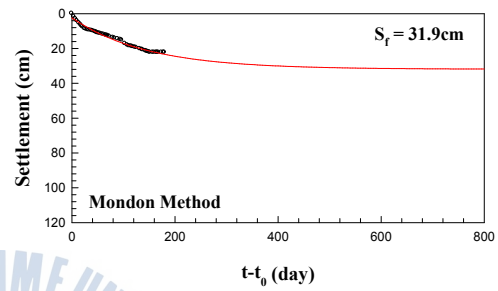
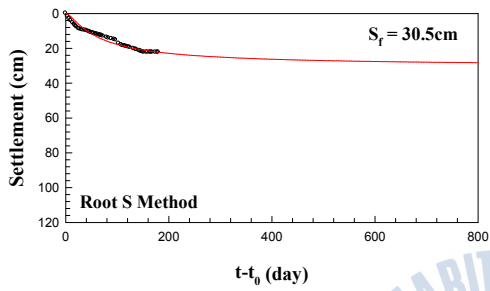
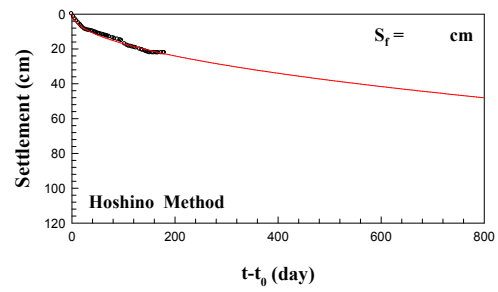
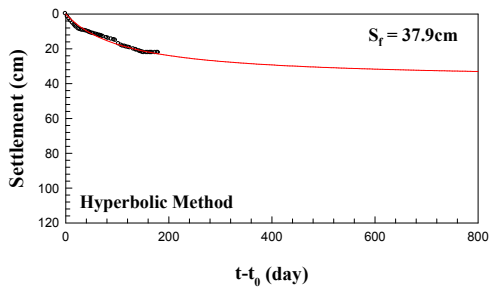


부록 H (continued)



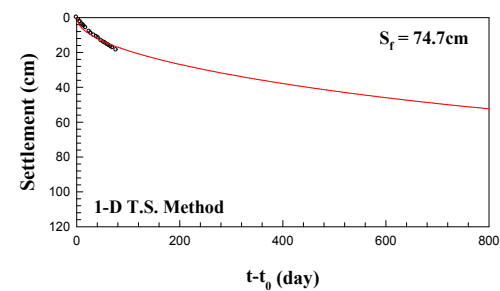
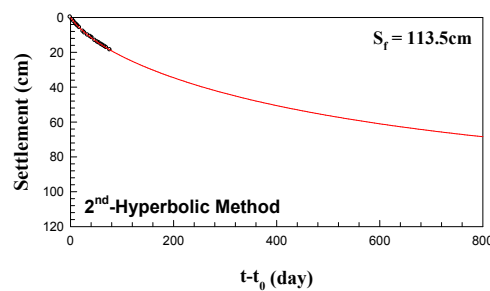
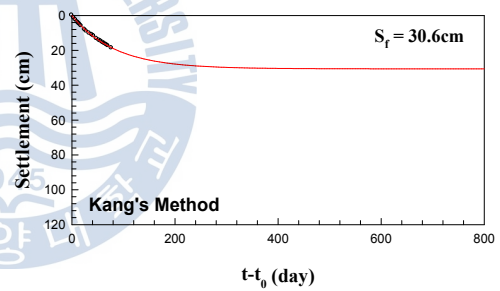
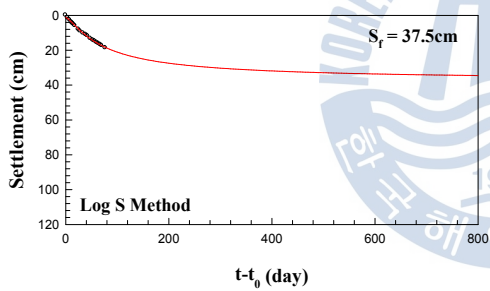
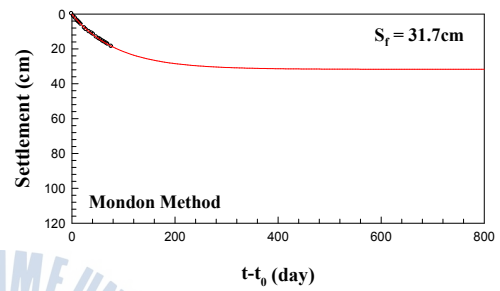
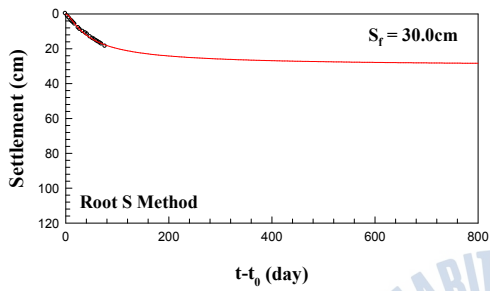
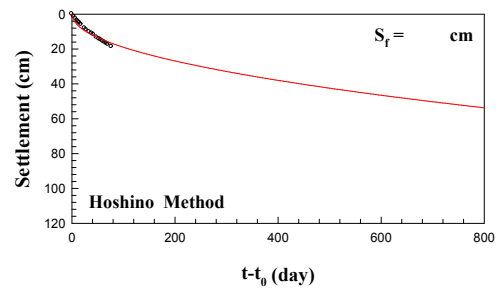
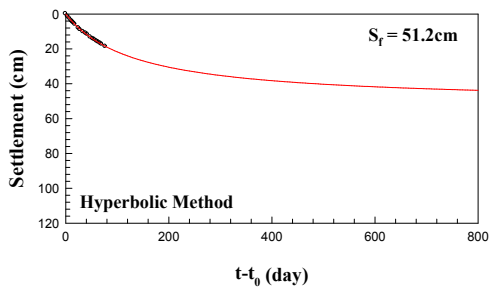
S-0 Plate

부록 I



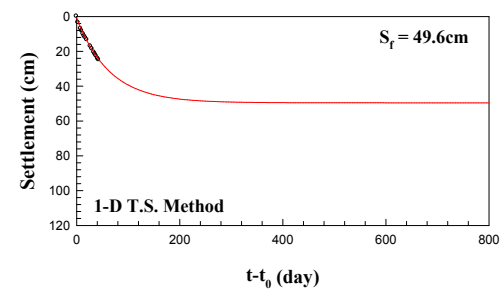
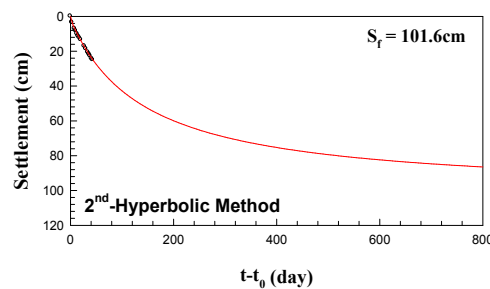
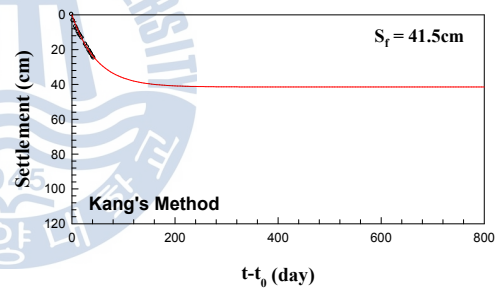
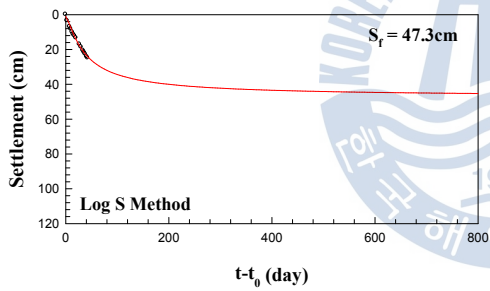
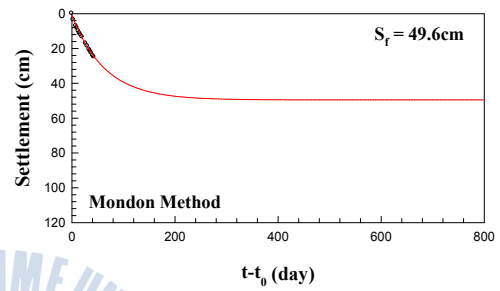
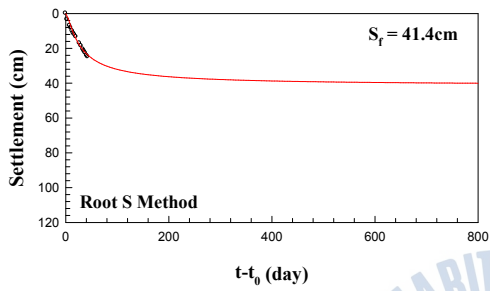
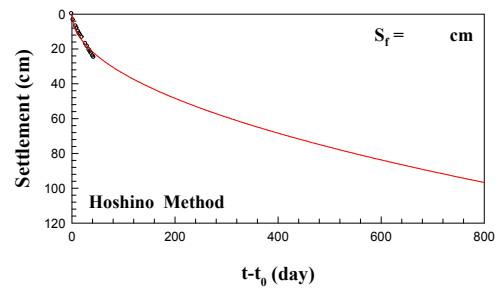
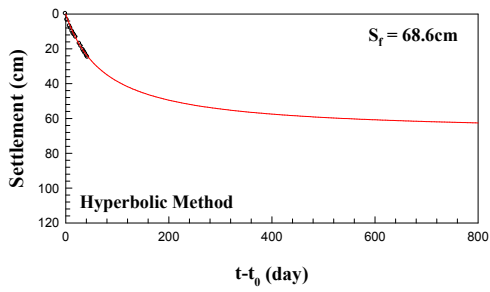
S-65 Plate

부록 I (continued)



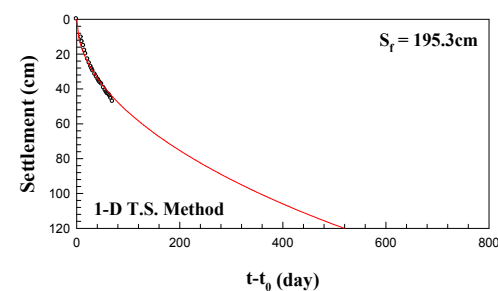
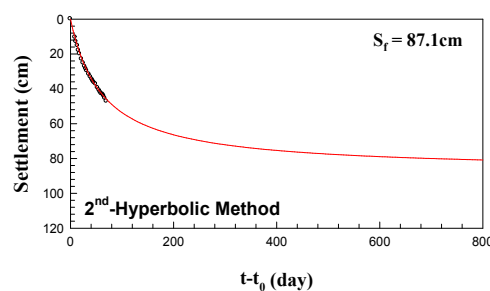
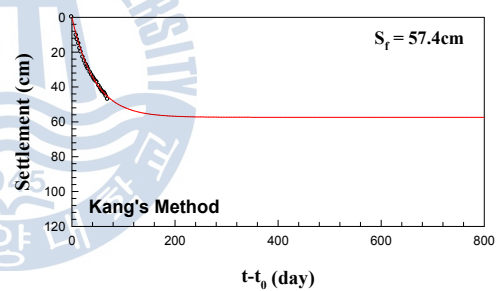
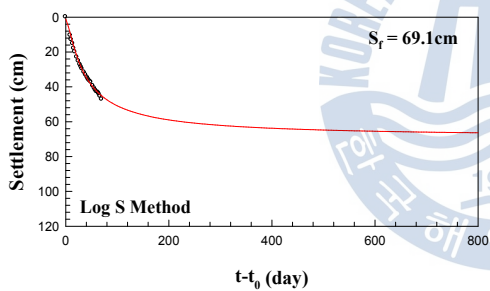
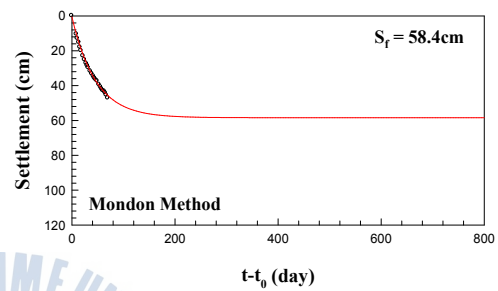
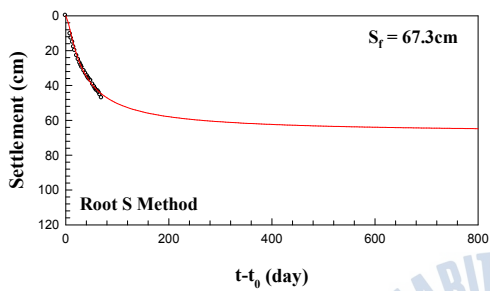
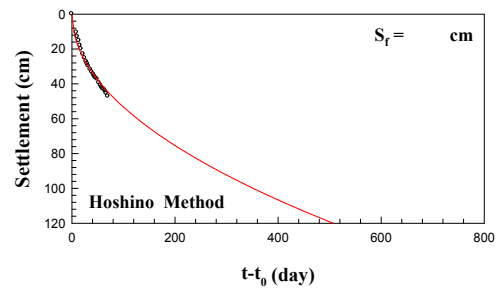
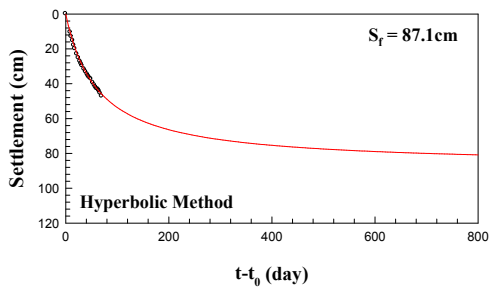
S-72 Plate

부록 I (continued)



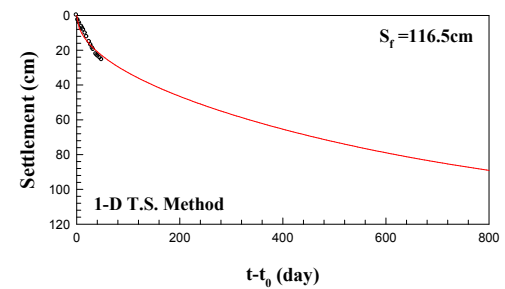
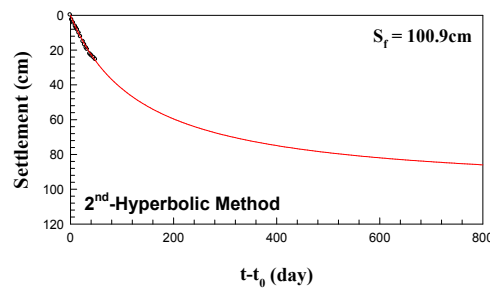
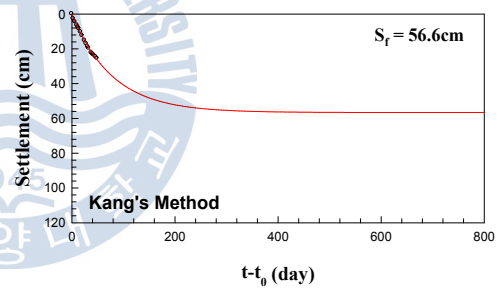
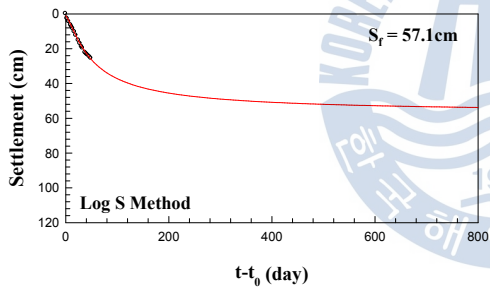
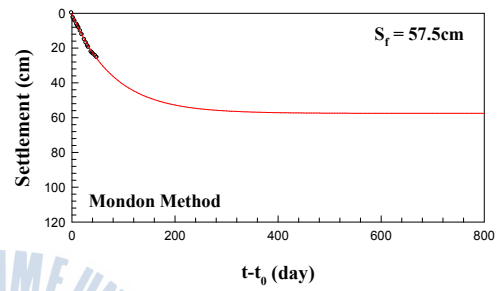
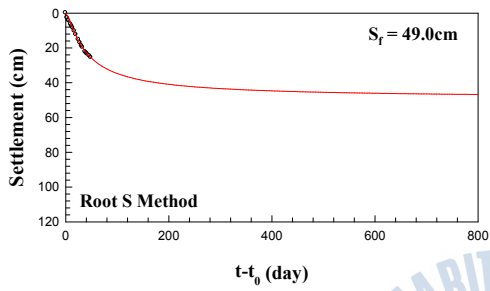
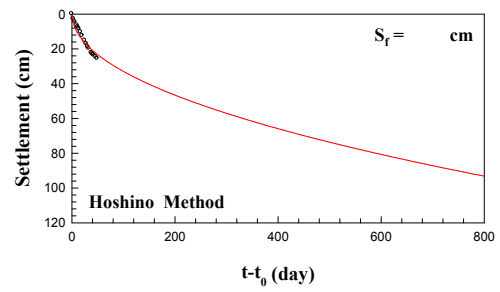
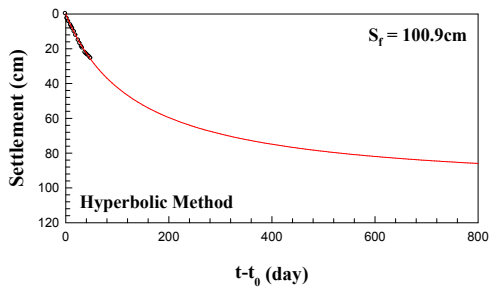
S-93 Plate

부록 I (continued)



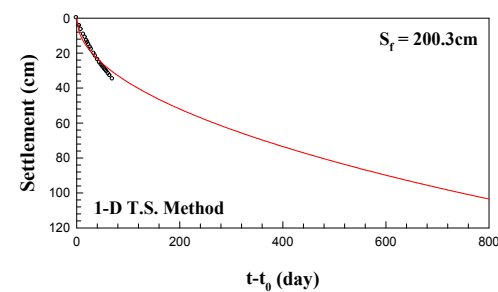
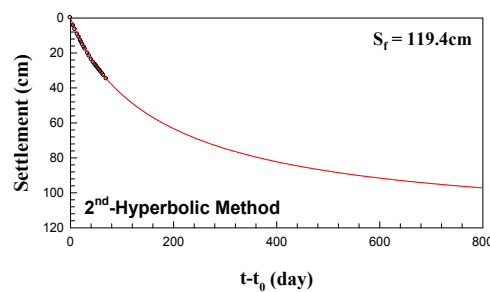
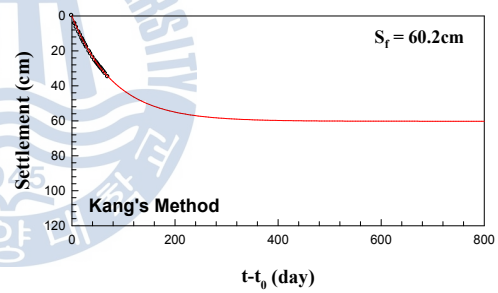
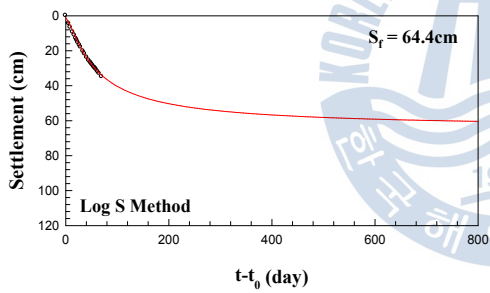
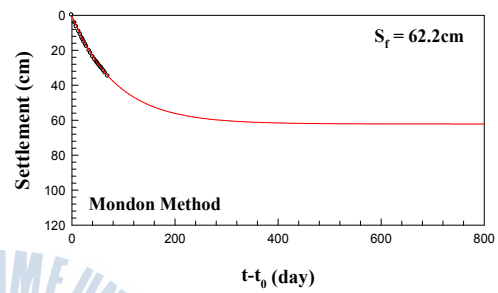
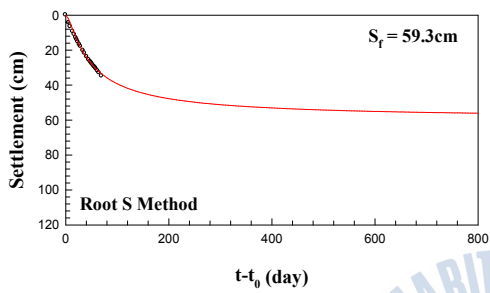
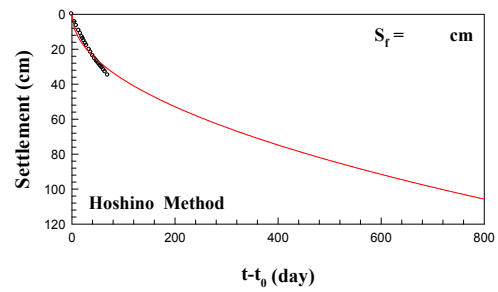
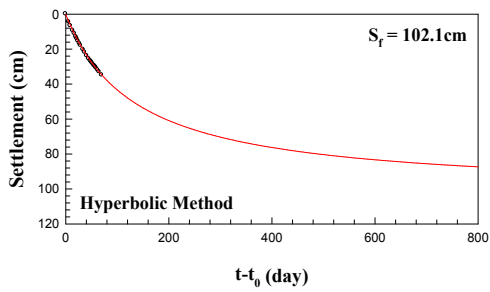
S-102 Plate

부록 I (continued)



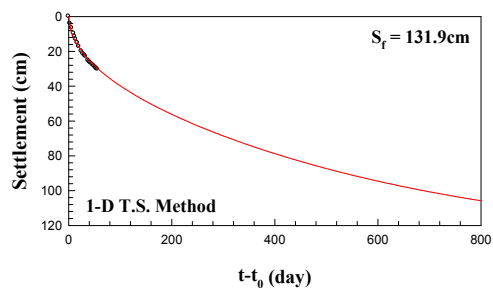
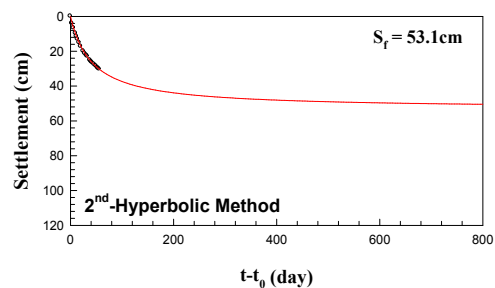
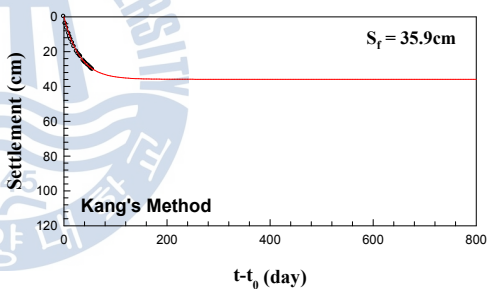
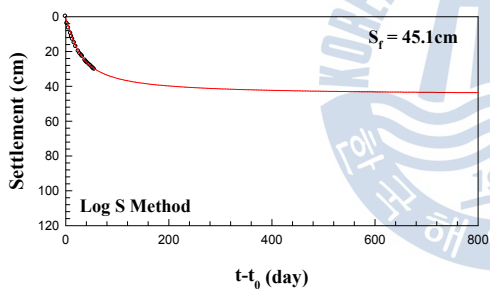
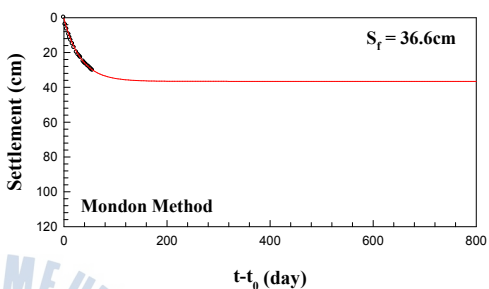
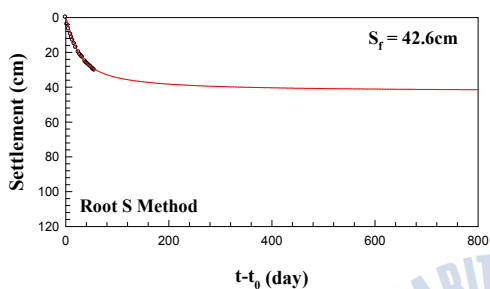
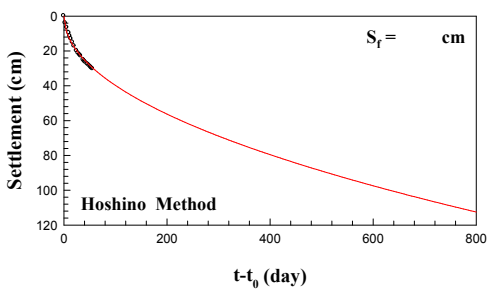
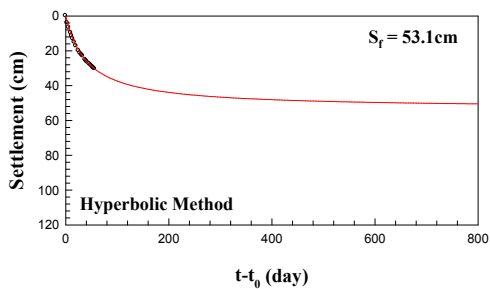
S-111 Plate

부록 I (continued)



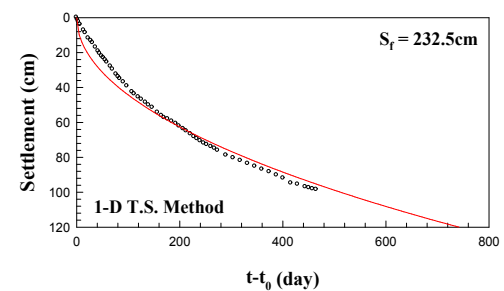
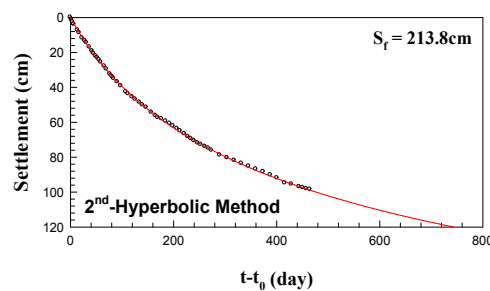
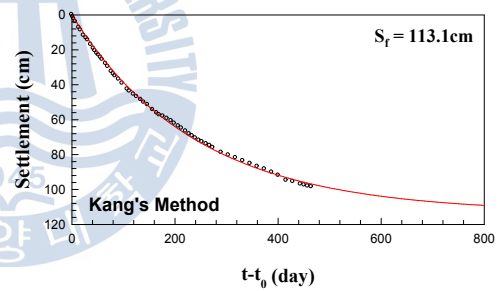
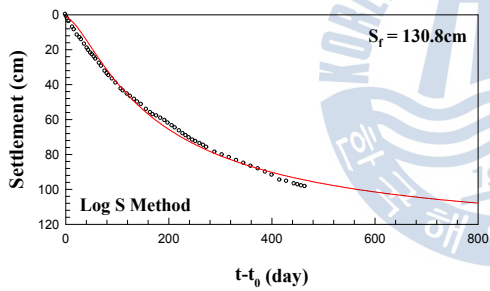
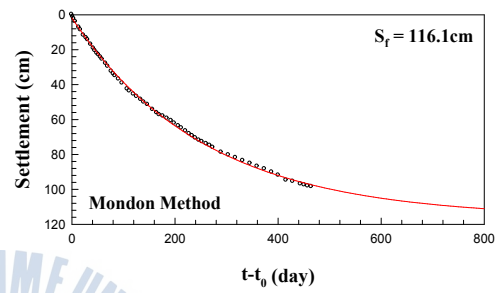
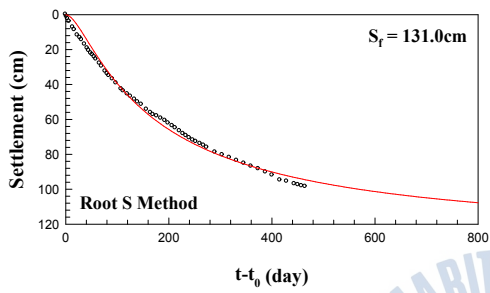
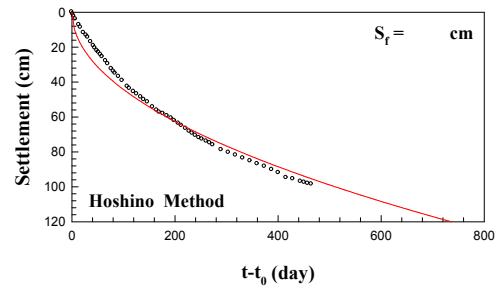
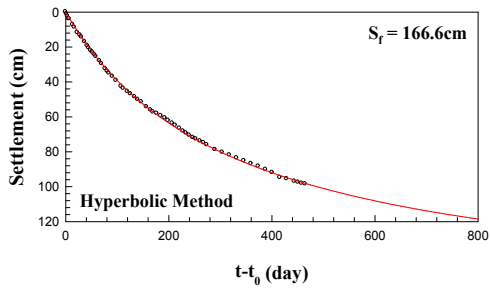
S-124 Plate

부록 I (continued)



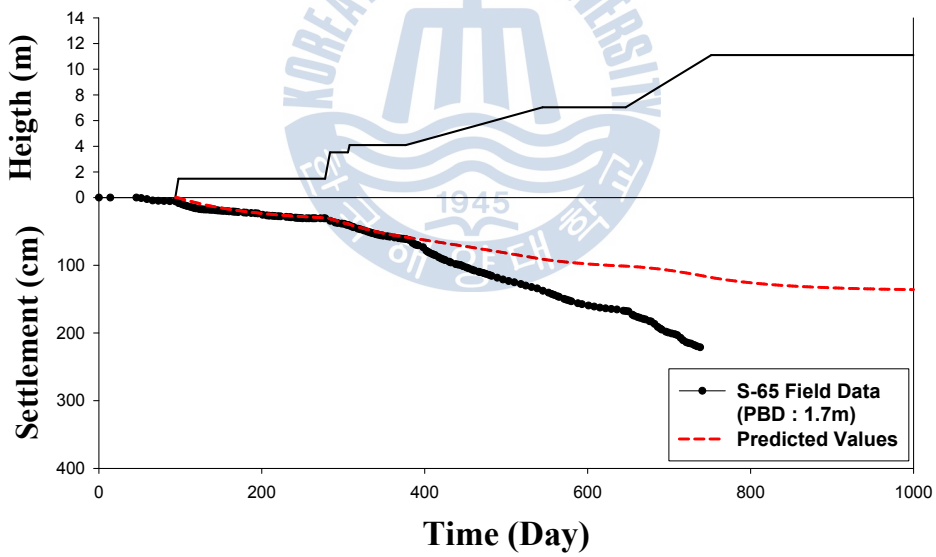
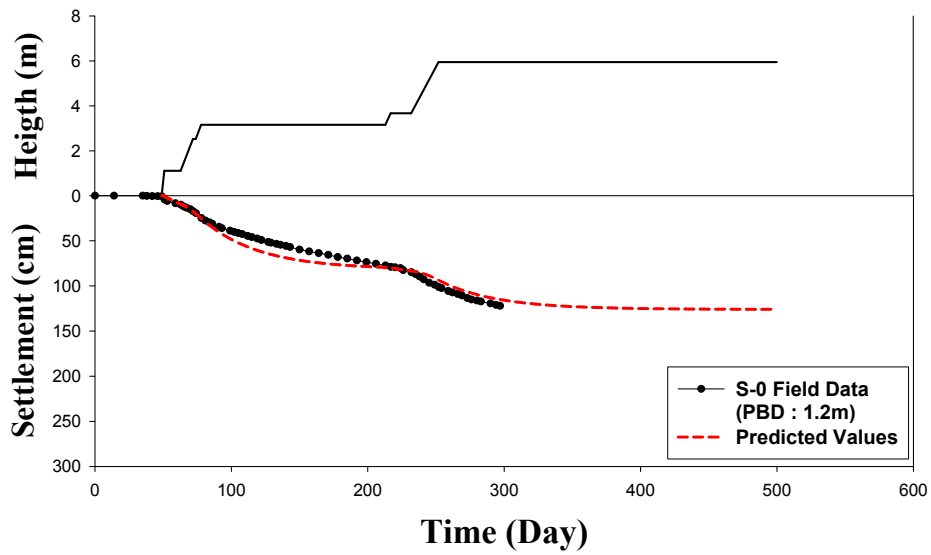
S-130 Plate

부록 I (continued)

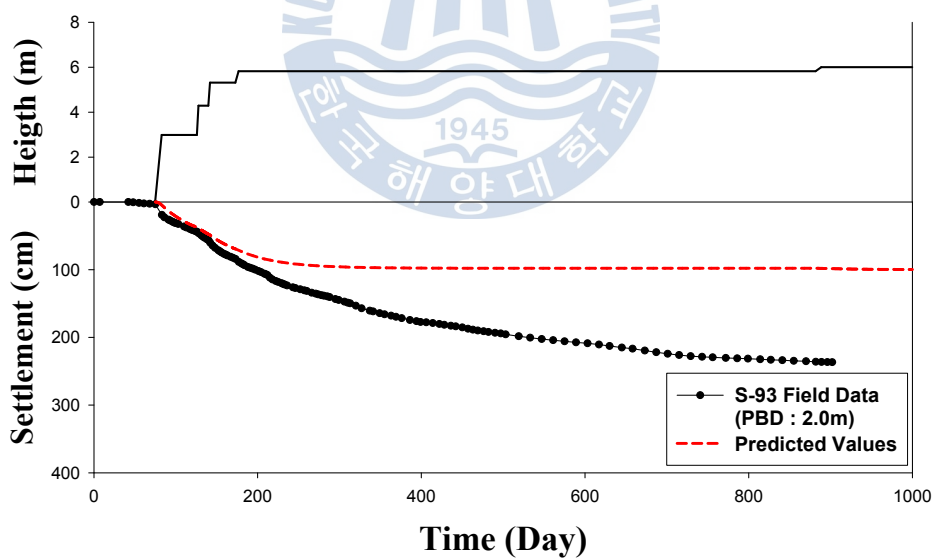
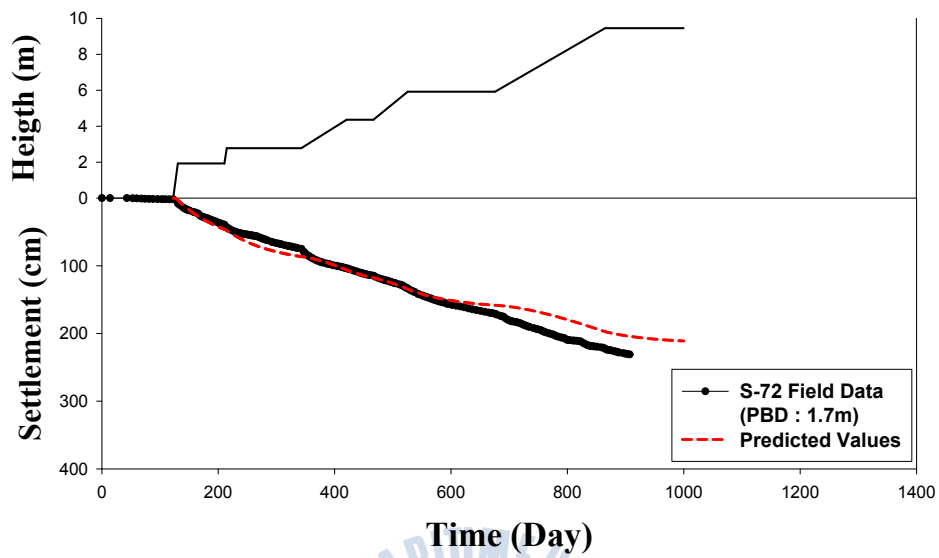


S-131 Plate

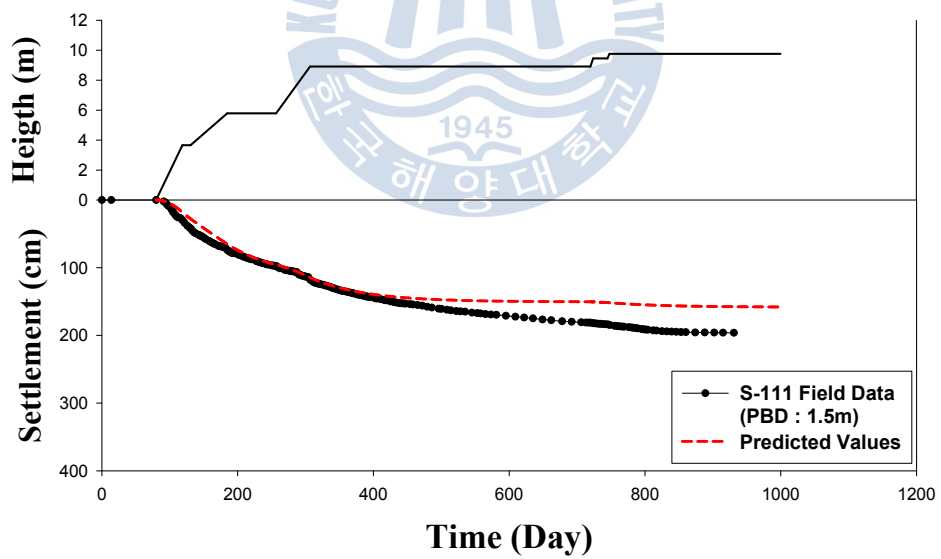
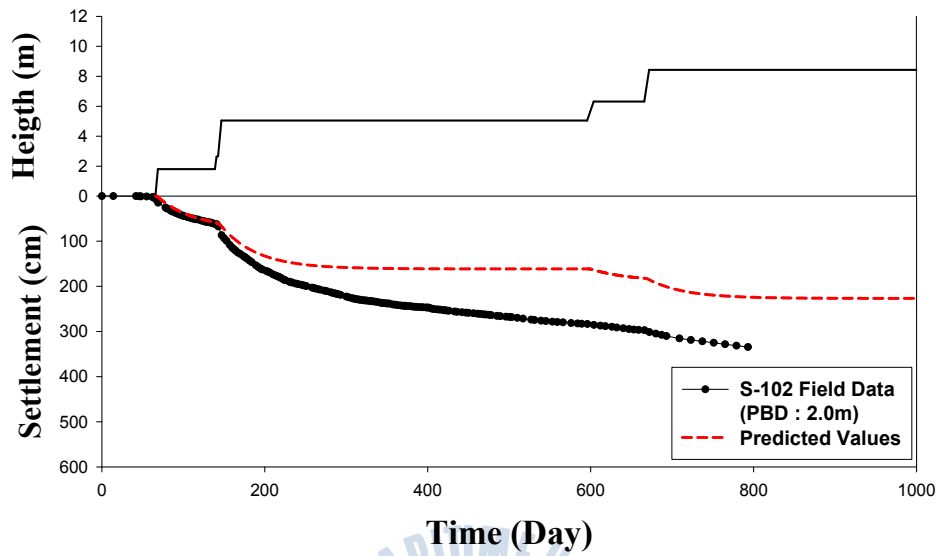
부록 I (continued)



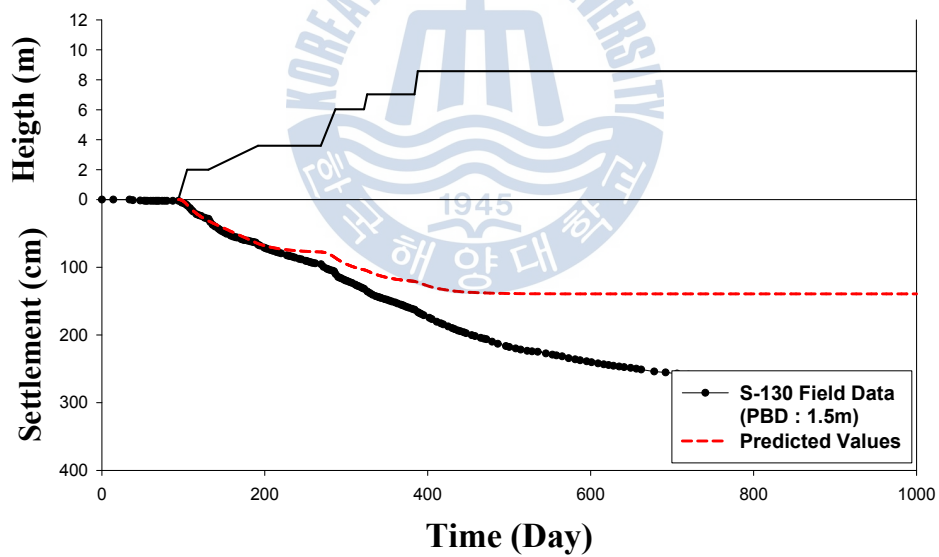
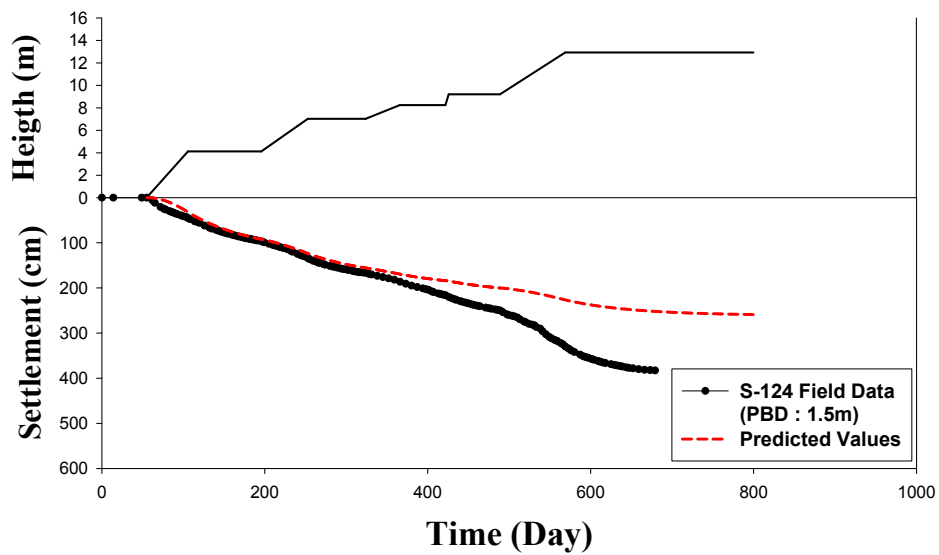
부록 J



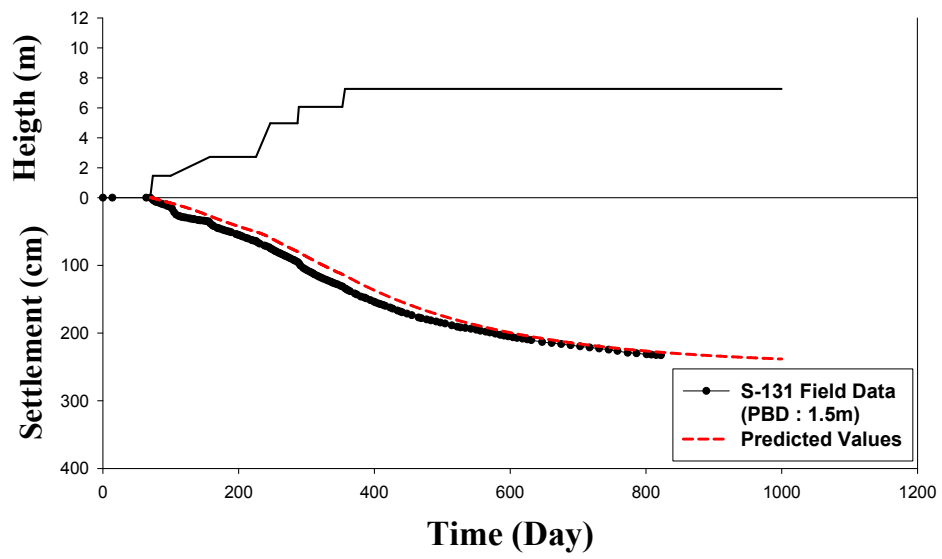
부록 J (continued)



부록 J (continued)



부록 J (continued)



감사의 글

2015년 청양씨의 해!

어느 해보다도 훨씬 값지고 소중한 한 해가 시작 되었습니다.

부족하나마 한 편의 논문을 완성하고 나니 새삼스레 부끄럽기도 하고, 많은 이들의 고마움이 주마등처럼 스쳐 지나갑니다.

오랜 기간 동안 많은 가르침과 부족한 저를 인간적으로 성숙시키기기 위해서 한결 같은 보살핌으로 이끌어 주시고 본 논문의 완성을 위해 온 정성과 심혈을 기울여 주신 지도교수 김태형 교수님께 진심으로 머리숙여 감사드립니다.

지난 시간동안 베풀어 주신 은혜에 조금이나마 보답하고자 더욱 더 학문의 길로 정진하고자 합니다.

또한, 대학원 생활 동안 항상 격려와 조언을 아끼지 않고, 여러 가지 바쁜 일정속에서도 열과 성을 다해 관심을 가져 준 이종우교수님, 항상 곁에서 묵묵히 지켜보시던 김도삼 교수님, 친형님 같은 경갑수 교수님, 그리고 김태곤 교수님. 이재하 교수님께 감사를 드리며, 본 논문의 심사를 맡아 세밀한 검토와 먼 길을 왕래하며 지도 조언을 해주신 김찬기 교수님, 세심하시고 뭔가 있으신 서영교 교수님, 위로며동갑이고, 따뜻함을 품으신 이종우 교수님, 항상 다 좋으신 경갑수 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

오늘날 제가 토질이라는 울타리 속에서 조그만 결실을 맺을수 있도록 인도해준 현대산업개발(주)조기영박사, KCC건설 성백석 소장, 국립방재연구원 박덕근 박사, 한국건설기술연구원 김창용 박사, 한국해양연구원 권오순 박사, 부경대학교 김운태 교수, (주)경하엔지니어링 오명주 박사, (주)지아이 김성욱 박사 등 동지연 회원님들 그 은혜 가슴속 깊이 간직하며 살겠습니다.

오랫동안 때론 교수님으로, 때론 큰형님으로서 바른길을 인도해주신 경성대학교

김성도 교수님께 큰 감사를 드리며, 항상 친구로 대해주고 격의없는 편안함을 선사해주는 동의대학교 권기철 교수님과 뽕때마다 즐거우신 동서대학교 공병승 교수님, 미소가 아름다운 부경대학교 이한우 교수님, 학교 간담시고 회사를 비울 때 든든한 버팀목 역할을 해준 장준환 선배님께도 감사를 드립니다

무엇보다 큰 도움을 준 후배 김주종 박사에게 무한한 감사와 영광을 돌리며, 후배의 가정에 행복이 함께하고, 하는 모든 일들 성과 있기를 빕니다.

긴 세월 동안 한결같이 자식 잘 되기만을 바라며, 365일 기도하시는 홀로 계신 어머님과 하나밖에 없는 동생 원(동욱)에게도 고마움을 전하며, 중학교 3학년 큰아들 상민, 초등학교 6학년 동진, 4학년 수현 세명의 자식 뒷바라지에 애태우는 아내에게 감사하단 말 전하고 싶습니다.

아주 귀한 딸을 저에게 주신 장인,장모께도 부끄럽지 않은 사위가 되도록 열심히 하겠습니다. 항상 건강하시기를 빕니다.

오늘의 이 결실은 주변에서 음양으로 격려하여 주시고 도와주신 많은 분들의 정성과 은덕이라 생각하며 다함께 보람을 나누고자 합니다. 많은 분들의 존엄 일일이 거론하지 못함을 죄송스럽게 여기며, 베풀어 주신 은혜 따뜻한 가슴속에 깊이깊이 간직하겠습니다.

한 살 더 먹을 때, 해가 가고 다시 올 때, 생전의 아버지 나이에 가까워 질수록 더욱 생각나는 선친께 이 줄고를 바칩니다.

2015.01.07.